

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK YANITLI TAGUCHI DENEY TASARIMI YÖNTEMİYLE
ÇELİK YÜZEYLERİNDE OLUŞTURULAN TERMO-KİMYASAL
KAPLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çiğdem CEBECİ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK YANITLI TAGUCHI DENEY TASARIMI YÖNTEMİYLE
ÇELİK YÜZEYLERİNDE OLUŞTURULAN TERMO-KİMYASAL
KAPLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çiğdem CEBECİ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şaduman ŞEN

HAZİRAN 2025

Çiğdem CEBECİ tarafından hazırlanan “ÇOK YANITLI TAGUCHI DENEY TASARIMI YÖNTEMİYLE ÇELİK YÜZEYLERİNDE OLUŞTURULAN TERMO-KİMYASAL KAPLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 26.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Şaduman ŞEN (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr. Aysun AYDAY Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr. Tijen ÖVER ÖZÇELİK Düzce Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ÇOK YANITLI TAGUCHI DENEY TASARIMI YÖNTEMİYLE ÇELİK YÜZEYLERİNDE OLUŞTURULAN TERMO-KİMYASAL KAPLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(26/06/2025)

Çiğdem CEBECİ





Rahmetli canım annem Nülüfer CEBECİ'ye



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
İÇİNDEKİLER	ix
TEŞEKKÜR	xiii
KISALTMALAR	xv
SİMGELER	xvii
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Literatür Çalışması	3
1.3. Çalışmanın Önemi	17
2. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIM YÖNTEMLERİ	19
2.1. Deney Tasarımının Tarihsel Gelişimi	19
2.2. Deney Tasarımı Yöntemi	20
2.3. Deney Tasarlanırken Süreçte Kullanılan Genel Kavramlar	21
2.4. Deney Tasarımındaki Temel Adımlar	22
2.5. Her Defada Tek Etken (HDTE)	24
2.6. Eşleştirilmiş karşılaştırma	24
2.7. Tam Faktöriyel Deney Tasarımı	24
2.7.1. Tam faktöriyel deneylerinde görülen avantajlar ve kısıtlar	25
2.8. Kısmi Faktöriyel	26
2.9. Latin Kareler	27
2.10. Greko-Latin Karesi	28
2.11. Box-Behnken	28
2.12. Taguchi Metodu	29
3. ÇALIŞMADA KULLANILACAK DENEYSEL VERİLER VE PROBLEMİN TANIMLANMASI	31
3.1. Giriş	31
3.2. Mikroyapı, Tabaka Kalınlığı, Sertlik ve Kırılma Tokluğu İncelemeleri	31
3.2. Problemin Tanımlanması	33
3.3. Hedefin Belirlenmesi	33
3.4. Faktör ve Seviyelerin Belirlenmesi	33
3.5. Problemin Çözümü İçin Önerilen Yöntem (Taguchi Yöntemi)	34
3.6. Taguchi Deney Tasarımı Yönteminin Adımları	34
3.6.1. Taguchi yönteminin gelişim süreci	35
3.6.2. Taguchi yönteminde kalite kontrol	35
3.6.3. Sistem tasarımı	36
3.6.4. Parametrelerin tasarlanması	36
3.6.5. Tolerans tasarımı	37

4. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN UYGULANMASI VE İSTATİKSEL ANALİZ. 39

4.1. Orthogonal Dizin Belirlenmesi	39
4.2. Taguchi Yönteminin Uygulanması.....	41
4.3. Kaplama Kalınlığı İçin Sinyal/Gürültü Oranı Hesaplanması	41
4.4. İstatiksel Analiz	42
4.4.1. Anova analizi.....	42
4.4.2. F testi	43
4.4.3. P testi	43
4.4.4. Sıfır hipotezi	44
4.4.5. P-değeri – alfa seviyesi	44
4.4.6. P-değerinin hesabı	44
4.4.7. P-değerinin anlamlılığı	45
4.4.8. P-değeri ne anlama gelir?	45
4.4.9. İki Farklı p-değeri olan test sonucunu karşılaştırmak	45
4.4.10. P-değerlerinin Kullanımı	45
4.5. Kaplanmış AISI 4140 Çeliği Kaplama Kalınlığı Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli	46
4.6. Kaplanmış AISI D2 Çeliği Kaplama Kalınlığı Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli	56
4.7. Kaplanmış AISI M2 Çeliği Kaplama Kalınlığı Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli	66
4.8. Kırılma Tokluğu İçin Sinyal/Gürültü Oranı Hesaplanması.....	77
4.9. Kaplanmış AISI 4140 Çeliği Kırılma Tokluğu Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli	77
4.10. Kaplanmış AISI D2 Çeliği Kırılma Tokluğu Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli	87
4.11. Kaplanmış AISI M2 Çeliği Kırılma Tokluğu Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli	96
4.12. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 Sertlik Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli	106
4.13. Anova Testi Sonuçları	115
4.13.1. Kaplanmış AISI 4140 çeliği kaplama kalınlığı sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli	115
4.13.2. Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli	117
4.13.3. Kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli	119
4.13.4. Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu sonuçlarına göre taguchi deney tasarım modeli	121
4.13.5. Kaplanmış AISI D2 çeliği kırılma tokluğu sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli	122
4.13.6. Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli	124
4.13.7. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 sertlik sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli	125
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	129
5.1. Deney sonuçlarının Taguchi yöntemiyle elde edilen sonuçlarla kıyaslanması	129
5.2. Sonuçlar.....	131
5.3. Öneriler.....	132

KAYNAKLAR	135
ÖZGEÇMİŞ.....	141





TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince, desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, sınırsız sabrı ve hoşgörüsüyle, sürekli eğiten, öğreten ve yönlendiren danışmanım Sayın Prof. Dr. Şaduman ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde, ilgileri, destek ve katkılarıyla yardımını esirgemeyen, benim için çok değerli sevgili arkadaşım Dr. Sedef KARA'ya çok teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında desteklerini gördüğüm sevgili kardeşim Birtan CEBECİ ve canım ağabeyim Atilla CEBECİ'ye, mutluluk ve yaşam enerjisi veren canım yeğenim Tan CEBECİ'ye çok teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmeme vesile olan rahmetli annem Nülüfer Cebeci'ye ve rahmetli babam Kazım CEBECİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çiğdem CEBECİ



KISALTMALAR

400HBW	: Hardox 400 çelik malzemesi
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AISI 4140	: (42CrMo4) Krom-molibden çeliği
AISI D2	: Soğuk iş takım çeliği
AISI M2	: Yüksek hız takım çeliği
Al/Bi	: Alkali Aktivatörün Bağlayıcı İçeriğine (Al/Bi) Oranı
ANOVA	: Analysis Of Variance (Varyans Analizi)
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışınları Spektroskopisi
GDT	: Gaz difüzyon tabakası
GRA	: Gri İlişkisel Analiz
HDTE	: Her Defada Tek Etken
İPK	: İstatistiksel Proses Kontrol
MATLAB®	: Basic Functions Reference
MRR	: Talaş Kaldırma Oranı
NS/NH	: Aktivatör/Bağlayıcı oranı
S/N	: Sinyal/Gürültü oranı
SAW	: Yüzeysel Akustik Dalga
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı
SR	: Yüzey Pürüzlülüğü
SS/SH	: Sodyum Silikatın Sodyum Hidroksit Oranı
Taguchi-DEAR	: Çok Yanıtlı Optimizasyon Yaklaşımı
TOPSIS	: İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği
TWR	: Takım Aşınma Oranı
UYPB	: Üretilen Ultra Yüksek Performanslı Betonda
YSA	: Yapay Sinir Ağları



SİMGELER

°C	: Santigrat derece
°K	: Kelvin derecesinde sıcaklık
µm	: Mikrometre
2C	: Çatlak boyu (mm)
A3B2C3	: Sıcaklık (A) 3. seviye, Süre (B) 2. seviye, Sertlik (C) 3. seviye
A3B3	: Sıcaklık (A) 3. seviye, Süre (B) 3. seviye
AISI 316Ti	: Paslanmaz çelik
AISI 420	: Martensitik Paslanmaz Çelik
cm/sa	: Santimetre/saat
CO	: Karbonmonooksit
CO ₂	: Karbondioksit
Cu	: Bakır elementi
Ç1050	: C50 çeliği
Ç4140	: 42CrMo4 Isıl işlem görmüş çelik
D	: Difüzyon katsayısı
Do	: Frekans faktörü
E	: Elastik modül (GPa)
EGR	: Egzoz Gazı Resirkülasyonu
F	: F testi
g/L	: gram/litre (Yoğunluk Birimi)
H0	: Sıfır hipotezi
H ₂ O ₂	: Hidrojen peroksit
Hv	: Sertlik (kg/mm ²)
HV	: Sertlik Birimi
k	: Faktörlerin sayısı
k	: Faktör sayısı
Kc	: Kırılma tokluğu (MPa. $m^{1/2}$)
kg/m ³	: kilogram/metreküp (Yoğunluk birimi)
kg/mm ²	: kilogram/milimetrekare
kJ/mol	: kilojoule/mol (Madde miktarı başına düşen enerji miktarı)

KOI	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
kPa	: kiloPascal (Basınç Birimi)
kV	: kilovolt (Güç birimi)
L18(61 x33)	: Taguchi karışık seviye ortogonal dizayn
L25	: Taguchi tasarım metodu, L25 ortogonal tasarım dizisi
L27	: Taguchi tasarım metodu, L27 ortogonal tasarım dizisi
L9	: Taguchi tasarım metodu, L9 ortogonal tasarım dizisi
LPG (B3)	: Sıvı Petrol Gazı
m/s	: metre /saniye
mm/dev	: mm/devir sayısı
mmol/L	: milimol /litre
MPa	: Mega Pascal (Basınç Birimi)
MPa.m^{1/2}	: Kırılma Tokluğu Birimi (Metrekare başına bir milyon Pascal)
n	: Gözlem sayısı
N	: Seçilen düzey sayısı
P	: Çatlak başlangıç yükü
P	: P testi
pH	: Hidrojen gücü (asitlik ya da alkalilik derecesini gösteren ölçek)
Q	: Aktivasyon enerjisi
r	: Tekrar sayısı
R-kare	: Anova testi anlamlılık seviyesi
Rpm	: Dakikada meydana gelen dönüş/devir sayısı
s	: Varyans
t	: süre
T	: Sıcaklık
TiAlSiN	: Titanyum Alüminyum Silisyum Nitrür
TiB₂/Al	: Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit (Titanyum diborür/Alüminyum)
TiO₂	: Titanyum dioksit
W/cm²	: Güç yoğunluğu birimi (Güç /Alan:Watt/cm ²)
x	: Tabaka kalınlığı
Xp	: Kontrol Edilebilir Değişkenler
Y	: Kalite değişkeni
ZnO	: Çinko oksit
Zq	: Kontrol Edilemeyen Değişkenler
α	: Güven seviyesi

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Kaplanmış üç çeliğe ait kaplama kalınlığı değişimleri.....	32
Tablo 3.2. 15 µm yüzeyden itibaren demir alüminid ile kaplanan üç çelik için sertlik dağılımları	32
Tablo 3.3. Kaplanmış çeliklere ait kırılma tokluk değişimleri.....	33
Tablo 3.4. Seviye ve faktörler	34
Tablo 3.5. Taguchi Deney Tasarımı Adımları	35
Tablo 4.1. Kaplama kalınlığı ve kırılma tokluğu deneyleri için faktörlerin ve toplam serbestlik derecesinin hesaplanması.....	39
Tablo 4.2. Kaplanmış üç çeliğe ait olarak kaplama kalınlığı değişimleri	40
Tablo 4.3. Kaplanmış üç çeliğe ait kırılma tokluğu değişimleri	40
Tablo 4.4. Sertlik deney sonuçları analizi için faktörlerin ve toplam serbestlik derecesinin hesaplanması	40
Tablo 4.5. 15 µm yüzeyden itibaren demir alüminid ile kaplanan üç çelik için sertlik dağılımları	41
Tablo 4.6. Seviye ve faktörler	41
Tablo 4.7. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı değişimleri	46
Şekil 4.6. Minitab programı kaplanmış AISI 4140 çeliği için kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarım arayüzü.....	49
Tablo 4.8. Kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı değişimler.....	56
Tablo 4.9. Kaplanmış AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı değişimler.....	66
Tablo 4.10. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin kırılma tokluk değişim değerleri	77
Tablo 4.11. 700 °C, 800°C ve 900 °C’de 1, 3 ve 5 saat süreyle kaplanan AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kırılma tokluğu değişimler....	77
Tablo 4.12. Kaplanmış AISI D2 çeliği kırılma tokluğu değişim değerleri	87
Tablo 5.13. Kaplanmış AISI M2 çeliği için kırılma tokluğu değişimler.....	96
Tablo 4.14. 15 µm yüzeyden itibaren demir alüminid ile kaplanan AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için sertlik dağılımları	106
Tablo 5.1. Deney sonuçlarına göre kaplanmış üç çeliğe ait olarak kaplama kalınlığı değişimleri	129
Tablo 5.2. Deney sonuçlarına göre kaplanmış üç çeliğe ait kırılma tokluğu değişimleri	129
Tablo 5.3. 15 µm yüzeyden itibaren demir alüminid ile kaplanan AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için sertlik dağılım deney sonuçları	130



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kalite yöntemlerinin karşılaştırılması.....	20
Şekil 2.2. Sistem veya süreç şekli	21
Şekil 3.1. 800°C 'de 3 saat süreyle kaplanan a) AISI 4140 b) AISI D2 c) AISI M2 çeliklerinin SEM görüntüleri.....	32
Şekil 4.1. Parametrelerin giriş ekran arayüzü	46
Şekil 4.2. Bağımsız faktörlerin programa girişi.....	47
Şekil 4.3. Taguchi deney tasarımı.....	47
Şekil 4.4. Program arayüzü.....	48
Şekil 4.5. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için kaplama kalınlığı Taguchi test üretimlerinin proses çıktı değerleri	48
Şekil 4.6. Minitab programı kaplanmış AISI 4140 çeliği için kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarım arayüzü.....	49
Şekil 4.7. Program arayüzü.....	49
Şekil 4.8. Taguchi deney tasarım arayüzü	50
Şekil 4.9. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü	50
Şekil 4.10. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü	51
Şekil 4.11. Sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği.....	51
Şekil 4.12. Minitab programı Anava testi hesaplama arayüzü	52
Şekil 4.13. Minitab programı Anova testi güven düzeyi analizi	52
Şekil 4.14. F, P testi ve model analiz sonuçları	53
Şekil 4.15. R kare değeri ve modelin anlamlılık seviyesi.....	53
Şekil 4.16. 700 °C, 800°C ve 900 °C'de 1, 3 ve 5 saat süreyle kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı analizi	54
Şekil 4.17. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri	54
Şekil 4.18. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri.....	55
Şekil 4.19. Minitab programı taguchi deney tasarımı açılış arayüzü.....	56
Şekil 4.20. Faktörlerin programa tanıtılması	57
Şekil 4.21. Taguchi deney tasarımı deney sayısı	57
Şekil 4.22. Minitab programı taguchi deney tasarımı deney sayısına göre sonuç arayüzü.	58
Şekil 4.23. Taguchi test üretimlerinin proses çıktı değerleri.	58
Şekil 4.24. Minitab programı kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarım arayüzü.....	59
Şekil 4.25. Performans ölçüm aracı arayüzü	59
Şekil 4.26. Taguchi deney tasarım arayüzü	60
Şekil 4.27. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü	60
Şekil 4.28. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü	61

Şekil 4.29. Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği	61
Şekil 4.30. Minitap programı kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı Anava testi hesaplama arayüzü	62
Şekil 4.31. Anova testi güven düzeyi analizi	62
Şekil 4.32. Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı F, P testi ve model analiz sonuçları	63
Şekil 4.33. Model summary tablo seçimi.....	63
Şekil 4.34. Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı R kare değeri ve modelin anlamlılık seviyesi.....	64
Şekil 4.35. Kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı analizi	64
Şekil 4.36. Kaplanmış AISI D2 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri	65
Şekil 4.37. Kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri.....	65
Şekil 4.38. Minitab programı taguchi deney tasarımı başlangıç arayüzü.	67
Şekil 4.39. Faktörlerin programa girişi	67
Şekil 4.40. Taguchi deney tasarımı	68
Şekil 4.41. Minitab programı Taguchi deney tasarım sonuçlar arayüzü.	68
Şekil 5.5.1. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için zaman, sıcaklık ve karbon yüzde oranlarına bağlı olarak sertlik Taguchi deney tasarımı analizi	131

ÇOK YANITLI TAGUCHI DENEY TASARIMI YÖNTEMİYLE ÇELİK YÜZEYLERİNDE OLUŞTURULAN TERMO-KİMYASAL KAPLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yapılan bu çalışmada daha önce gerçekleştirilen, ‘Termoreaktif difüzyon yöntemiyle çeliklerin demir alüminid kaplanması’ adlı yüksek lisans tez çalışmasının deneyde kullanılan parametrelerine Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Bunun nedeni, deney sayısını en aza indirerek zaman ve maliyetten tasarruf etmek, kaliteden ödün verilebilecek farklılıkları azaltmak ve kullanılan parametrelerden optimum fayda sağlamaktır. Bu amaçla 22 mm çapındaki AISI 4140, AISI M2, AISI D2 çelik çubuklar 5 mm kalınlığında kesilerek, 700°C, 800°C ve 900 °C’lerde 1, 3 ve 5 saat süre zarfında saf alüminyum, alümina, amonyum klorür ve naftalinden oluşan toz karışımı hazırlanmış, termokimyasal işlemleri yapılmış ve demir alüminid kaplaması gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış AISI 4140, AISI M2, AISI D2 çeliklerinin kaplama kalınlığı, sertlik incelemeleri, kırılma tokluğu incelemeleri sonuçları Taguchi yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırması yapılmıştır. Parametreler optimize edilerek en iyi etki eden parametreler belirlenmiştir.

Kaplama kalınlığı ve kırılma tokluğu deney sonuçlarına göre yapılan Taguchi analizlerinde L9 ortogonal dizini kullanılmıştır, yapılan her deney için S/N oranı bulunmuştur. Sertlik deney sonuçlarına göre yapılan Taguchi analizlerinde ise, faktör ve level seviyesine uygun ortogonel dizin ise, L9(3³) olarak seçilmiştir. Dokuz farklı deney yapılmıştır. Varyans analizi ile grafiksel gösterim metoduna yer verilmiştir.

Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak kaplama kalınlığı, kırılma tokluğu ve sertlik için kaplanmış 4140, M2 ve D2 çeliklerine üretim reçeteleri hazırlanmıştır.

Kaplanmış AISI 4140 çeliği için kırılma tokluğu ve kaplama kalınlığı üretim reçetesi A₃B₃ olarak hesaplanmıştır.

Kaplanmış AISI D2 çeliği için kaplama kalınlığı reçetesi A₃B₃, kırılma tokluğu A₃B₃ olarak bulunmuştur. Kaplanmış AISI M2 çeliği için kaplama kalınlığı reçetesi A₃B₃, kırılma tokluğu üretim reçetesi A₃B₃ olarak hesaplanmıştır.

Kaplanmış üç çelik için sertlik üretim reçeteleri ise, A₃B₂C₃ olarak hazırlanmıştır. Bu deneyde en ideal parametre değerleri, 900°C de 3 saat süreyle 0,95 karbon yüzdesi içeren AISI M2 çeliği olmuştur.

Taguchi deney tasarımı sayesinde bu çalışmada uygun kombinasyonlar belirlenerek zamandan ve maliyetten kazanç sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Taguchi yöntemi, AISI 4140, AISI M2, AISI D2 çeliklerinin demir alüminid kaplaması, Minitap programı, optimasyon



INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF THERMO-CHEMICAL COATINGS FORMED ON STEEL SURFACES BY USING MULTI-RESPONSIVE TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN METHOD

SUMMARY

In this study, the Taguchi method was applied to the experimental parameters of the previously conducted master's thesis titled 'Iron aluminide coating of steels by thermoactive diffusion method'. The reason for this is to save time and cost by minimizing the number of experiments, reduce quality differences and ensure that the design parameters give the best results. For this purpose, AISI 4140, AISI M2, AISI D2 steel bars with a diameter of 22 mm were cut to 5 mm thickness, a powder mixture consisting of pure aluminum, alumina, ammonium chloride and naphthalene was prepared at 700°C, 800°C and 900°C for 1, 3 and 5 hours, thermochemical processes were carried out and iron aluminide coating was carried out.

The coating thickness, hardness and fracture toughness results of AISI 4140, AISI M2 and AISI D2 steels were compared with the results obtained by the Taguchi method. The parameters were optimized and the best affecting parameters were determined. In the Taguchi analyzes made according to the coating thickness and fracture toughness test results, since temperature and time were made according to two parameters, the number of factors was taken as 2 and the number of columns was taken as Level 3. Nine different experiments were carried out. The median index suitable for factor and level was selected as $L9(3^2)$.

In the Taguchi analyses made according to the hardness test results, it was taken as Level 3 because the number of factors was 3 and the number of columns was 3, since it was made according to three parameters according to temperature, time and the percentage of carbon they contain. Nine different experiments were conducted. The median index suitable for the factor and level was selected as $L9(3^3)$.

According to Taguchi experimental design analysis of the coating thickness depending on time and temperature for AISI 4140 steel coated at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 1, 3 and 5 hours, it is seen that the temperature is acceptable at 800 °C and 900 °C. 700°C is below the line and is an inappropriate temperature value. 900°C is the most appropriate parameter for this experiment. 3 hours and 5 hours are acceptable values as a duration. Since 1 hour is below the line, it is not appropriate. 5 hours is the most appropriate duration for this experiment. According to the coating thickness results in the test conducted for AISI 4140 steel, 5 hours at 900°C is the most suitable value.

According to the AISI 4140 steel coating thickness test results, the R square value was calculated as 99.34% by applying the Anova test. The R square value explains whether the model is significant or not. When looking at the R square value, the model is successful. The 'P' value is also considered successful below 0.005. The 'P' value is calculated as 0.000 for temperature. It is calculated as 0.000 for time. Accordingly, temperature and time values are variables that give the same level of correct value.

The 'F' value was calculated as 208.49. The 'F' value for time was calculated as 93.33. The 'F' value means that the variable that is large is the first degree important parameter. For this experiment, it was observed that temperature was the first degree important parameter and time was the second degree important parameter.

According to Taguchi experimental design analysis, the coating thickness for AISI D2 steel coated at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 1, 3 and 5 hours, depending on time and temperature, gives the best result at 900 °C. It coincides with the line at 800 °C. Since it is not below the line, this is still an acceptable temperature. 700°C is below the line and is an inappropriate temperature value. For this experiment, 900°C is the most appropriate parameter value. 3 hours and 5 hours are acceptable values for the duration. The duration is not suitable because it is below the 1 hour line. 5 hours is the most suitable duration for this test. In this test conducted for AISI D2 steel, 5 hours at 900°C is the most intensive value according to the coating thickness results.

According to the ANOVA test results for AISI D2 steel coating thickness, the R square value is 97.29%. The R square calculation provides information about the significance of the model. Considering this value, the model is successful. If the 'P' value is below 0.005, it means it is successful. The 'P' value is calculated as 0.001 for temperature and 0.008 for time. Accordingly, the temperature parameter is the variable that gives the most accurate value.

When the F value is examined, 51.77 is calculated for temperature. The 'F' value for time is 19.98. This means that the variable with the highest 'F' value is the most important parameter. According to this experiment, temperature is the most important parameter, while time is the second most important parameter.

For AISI M2 steel coated at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 1, 3 and 5 hours, the coating thickness changes depending on time and temperature. The temperature is suitable at 800 °C and 900 °C. Since it is higher at 900 °C, it is the best result value. It remained below the 700 °C line and is an unsuitable temperature value. For this experiment, 900°C is the most suitable parameter. 3 hours and 5 hours are acceptable values for the duration. Since 1 hour is below the line, it is not suitable. 5 hours is the most suitable duration for this experiment. According to the coating thickness results in the experiment conducted for AISI M2 steel, 5 hours at 900°C is the best value.

ANOVA test was applied to AISI M2 steel coating thickness test results and according to the test result, R square value was 99.47%. This result shows that the established model is successful and significant. 'P' value is successful below 0.005. 'P' value was calculated as 0.000 for temperature. It was calculated as 0.000 for time. Accordingly, temperature and time are the variables that give the most accurate value at equal levels.

The F value was calculated as 281.86 for temperature. The 'F' value for time was 93.84. This means that the variable with the highest 'F' value is the most important parameter. According to this experiment, temperature is the most important parameter, while time is the second most important parameter.

For AISI 4140 steel coated at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 1, 3 and 5 hours, fracture toughness is suitable at 800 °C and 900 °C depending on time and temperature. It gives the best result since it is higher at 900 °C. 700°C is below the line and is an inappropriate temperature value. 900°C is the most appropriate value parameter for this test. 5 hours is an acceptable value as a duration. Since the durations are 1 hour and 3 hours below the line, they are not appropriate. 5 hours is the most appropriate

time for this test. In other words, in the test conducted for AISI 4140 steel, 5 hours at 900°C is the most appropriate value according to the fracture toughness results.

Anova test was applied to AISI 4140 steel fracture toughness test results. R square value was 93.01%. 'P' value is successful below 0.005. 'P' value was calculated as 0.010 for temperature. It was calculated as 0.036 for time. Accordingly, it is not significant because temperature and time are above 0.005.

When the F value is examined, 18.03 is calculated for temperature. The 'F' value for time is 8.60. This means that the variable with the highest 'F' value is the most important parameter. According to this experiment, temperature is the most important parameter, while time is the second most important parameter.

For AISI D2 steel coated at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 1, 3 and 5 hours, the fracture toughness is suitable at 800 °C and 900 °C depending on time and temperature. It is most suitable at 900 °C. It remained below the 700 °C line and is an unsuitable temperature value. For this test, 900°C is the most suitable parameter value. 3 and 5 hours are acceptable values for duration. 5 hours is the most suitable time for this test. According to the fracture toughness results in this test for AISI D2 steel, 5 hours at 900°C is the most suitable value.

Anova test was applied according to AISI D2 steel fracture toughness test results. R square value was found to be 86.37%. According to this value, the model is successful. The 'P' value is successful below 0.005. The 'P' value was calculated as 0.087 for temperature. It was calculated as 0.041 for time. Accordingly, since temperature and time were above 0.005, they are not significant.

When the F value is examined, the temperature is calculated as 4.77. The 'F' value for time is 7.91. This means that the variable with the highest 'F' value is the primary important parameter. According to this experiment, time is the primary important parameter, while temperature is the secondary important parameter.

For AISI M2 steel coated at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 1, 3 and 5 hours, the fracture toughness temperature value depending on time and temperature is suitable at 900 °C. 700 °C and 800 °C remained below the line and are inappropriate temperature values. For this experiment, 900 °C is the most appropriate value parameter. 5 hours is an acceptable value as a duration. 5 hours is the most appropriate duration for this experiment. 1 hour and 3 hours remained below the line. According to the fracture toughness results in the experiment conducted for AISI M2 steel, 5 hours at 900 °C is the most appropriate value.

The Anova test was applied to the AISI M2 steel fracture toughness test results and the R square value was found to be 98.12%. The result shows that the established model is successful. The 'P' value is successful below 0.005. The 'P' value was calculated as 0.000 for temperature. It was calculated as 0.013 for time. Since the temperature was above 0.005, it is not significant.

When the F value is examined, the temperature is calculated as 88.98. The 'F' value for time is 15.42. This means that the variable with the highest 'F' value is the primary important parameter. According to this experiment, temperature is the primary important parameter, while time is the secondary important parameter.

The Taguchi method was applied to the hardness distributions of AISI 4140, AISI D2 and AISI M2 steels coated with iron aluminide starting from a 15 µm surface at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 1, 3 and 5 hours. In the Taguchi experimental design model

made for the hardness values of AISI 4140, AISI D2 and AISI M2 steels, the temperature is suitable at 800 °C and 900 °C.

It remained below 700°C and is an inappropriate temperature value. For this experiment, 900°C is the most appropriate parameter value. Only 3 hours is an acceptable value as a duration. 3 hours is the most appropriate duration for this experiment. The duration remained below the line for 5 hours. The duration is not appropriate because it coincides with the line for 1 hour. In this experiment conducted for AISI 4140, AISI D2 and AISI M2 steels, 3 hours at 900°C is the most appropriate value according to the hardness values.

When the carbon percentages of the steels are considered, AISI M2 steel with 0.95 percent carbon yielded the best result. The second best value is AISI D2 steel with 1.33 percent carbon content. AISI 4140 steel with 0.40 percent carbon content is not suitable because it is below the line. As a result, the most ideal parameter values in this experiment were AISI M2 steel at 900°C for 3 hours.

For AISI 4140, AISI D2 and AISI M2 steels, the Anova test was applied according to the hardness values of the experiments. The R square value was 91.38%. This value is successful. When the R square value in this experiment is examined, it means that the model is correctly established. The 'P' value is successful below 0.005. The 'P' value was calculated as 0.309 for temperature. It was calculated as 0.761 for time. The 'P' value was calculated as 0.111 according to carbon percentages.

When the F value is examined, the temperature is calculated as 2.24. The 'F' value for time is 0.31. According to the carbon percentage ratio, the 'F' value is calculated as 8.04. This means that the variable with the highest 'F' value is the most important parameter. According to this experiment, the carbon percentage ratio is the most important parameter, the second most important parameter is temperature, and the third most important parameter is time.

Among the control parameters, the temperature parameter was observed to have the highest effect in the coating thickness and fracture toughness experiments. The optimum values of the process parameters were measured as; hardness 350-480HV, coating thickness 35-346 µm, activation energy 148.84 kJ/mol, fracture toughness 0.7-2.87 MPa.m^(1/2) under 5 gram load at a distance of 15 micrometers from the outermost surface.

Production recipes were prepared for AISI 4140, AISI M2 and AISI D2 steels for coating thickness, fracture toughness and hardness using the Taguchi experimental design method.

Fracture toughness and coating thickness production recipe for AISI 4140 steel were calculated as A₃B₃.

For AISI D2 steel, the coating thickness prescription is A₃B₃ and the fracture toughness is A₃B₃. For AISI M2 steel, the coating thickness is A₃B₃ and the fracture toughness production prescription is A₃B₃.

AISI 4140, AISI D2 and AISI M2 hardness production recipes were prepared as A₃B₂C₃. The most ideal parameter values in this experiment were AISI M2 steel containing 0.95 carbon percentage at 900°C for 3 hours. In hardness experiments, diffusion thickness and hardness are required to be at maximum levels. It is expected that the hardness of the steel with a high carbon percentage will be higher. Despite having the second highest carbon percentage in this study conducted with the Taguchi

method, the reason why AISI M2 steel is the most ideal is that it contains Tungsten (W) and Molybdenum (Mo) with a balanced composition affecting the hardness. Tungsten content is 6.8, Molybdenum content is 4.43. This ratio is 0 for 'W' and 0.77 for 'Mo' in AISI D2 steel. While 'W' is 0, 'Mo' is 0.18 in AISI 4140 steel. The high W and Mo content of AISI M2 steel compared to other steels causes its hardness to be high.

The most important stage required for the implementation of quality with the Taguchi Experimental design method is the design studies carried out before production. When applying the Taguchi Experimental design method, the established model must be meaningful. In order to measure the quality of the established model, the ANOVA test should be applied to the model. In this way, it is measured whether the established model is meaningful or not. It is extremely important that the model is consistent and meaningful.

When applying the Taguchi method, controllable factors that cause variability must be identified. It is also extremely important to design the product and process development process in a way that minimizes the effects of uncontrollable factors. The parameters that affect the performance of the process must be determined correctly.

Key words: Taguchi method, iron aluminide coating of AISI 4140, AISI M2, AISI D2 steels, Minitap program, optimization



1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Mühendislik alanında yapılan araştırma geliştirme çalışmalarında, hedeflenen tasarlanan sistemin veya geliştirilmesi istenen ürünün en yüksek performansla çalışmasıdır. Bunu sağlayabilmek için öncelikle performansı belirleyen özelliklerin neler olduğu saptanır ve bu özelliği etkileyen faktörlerin neler olduğu araştırılır. Sırasıyla bu faktörlerin performansı nasıl etkiledikleri deneyler yapılarak tespit edilir. Deneyler sonunda elde edilen performans değerlendirilerek en iyi performansı veren optimum şartlar belirlenir. Yapılan bu deneyler ile sistemden istenen soruların cevabı alınmış olur. Burada önemli olan husus sisteme doğru soruların sorulmasıdır. Sisteme doğru soruların sorulması için her bir faktörü birer birer ele almak ve faktörlerin sistemi nasıl etkilediklerinin incelenmesidir. Fakat bunu yaparken faktörler arasındaki etkileşimleri yok saymak ve bir faktörün etkisini değerlendirirken diğer faktörlerin sonuçlar üzerinde oluşturduğu etki bizi yanıltacaktır. Bütün kombinasyonları denemek ise maliyette ve zamanda artışa neden olacaktır. Bu durumu gerçekleştirmekte çoğu zaman imkansızdır. Sadece deneyleri yaparak ve sonuçları değerlendirmek yetersiz kalacaktır. Bu yüzden sonuçların analizi için istatistiksel yöntemleride kullanmak gerekir. Çünkü yapılan her deneyde belli bir oranda hata payı olacaktır. Yüksek verim ve düşük maliyetli göz önüne alarak bu deneylerin ekonomik şekilde gerçekleştirmek ve zaman kısıtlarınıda gözeterek maksimum verimle gerçekleştirmek, hem de sonuçları doğru şekilde yorumlayabilmek çok önem arz eder. Aynı zamanda kalite ve verimliliğin artmasını destekleyici bir yönü vardır. Böylelikle Taguchi Deney Tasarımı yöntemi optimize edilmesi gereken problemlerin çözülmesinde başarılı bir yöntem olarak karşımıza çıkar. Taguchi metodu ile problemi en az deney ile çözmekle kalmaz aynı zamanda ürün çıktısının yüksek kalitede olma şartlarını taşımasını destekler. Ürünün veya prosesin kontrol edilemeyen faktörlere üretim koşullarına göstermiş olduğu minimum seviyedeki hassasiyet gereken toleransları minimum maliyetle gerçekleştirilmesine olanak tanır. Kalite maliyeti anlayışı çerçevesinde, Taguchi kayıp fonksiyonu ürünün kaliteden ötürü toplumdaki olumsuz düşünceleri minimize etmesi açısından yeni bir değerlendirme sunması da dahildir.

Günümüzde üretim yapan şirketler, kaliteli ürün üretmek için bazı uluslararası standartlara uymak zorunda kalmışlardır. Bu standartları sağlamak ise bazı maliyetlere katlanmaları gerekir. Kaliteli üretim yaparken oluşan maliyetleri minimize etmek için kalite kontrol yöntemleri uygulatırlar. Kaliteli ürün üretmenin yol açtığı maliyetler, kalite kontrol yöntemlerini uygulanırken gerçekleşen maliyetler, hammadde kullanımında kalite limitlerine uymanın getirdiğı maliyetler olmak üzere üreticinin katlanması gereken kalite maliyetleri olarak sınıflandırılır. Üretim esnasında uyulması gereken bazı limitler vardır. Bu limitlere uyulmadığı takdirde hedef değere çok yakın üretim yapılsa dahi kayıplara neden olur. Bu yüzden üreticilerin uygun maliyetlerle üretim yaparken, tüketicinin memnun olduğı kalitede üretim yapmaya çalışması önemli bir konudur.

Kaliteyi tasarım aşamasında sağlamanın yollarından biri de deney tasarımıdır. Taguchi metodu istatistiksel deneysel tasarıma dayalı bir yöntemdir. Taguchi metodu ürünün tolerans değerlerinin belirlenmesinde, üretim esnasında kalite ve maliyeti etkileyen faktörlerin hangi düzeyde olduğunu, etki eden bu faktörlerin olması gereken en ideal değerlerinin neler olduğunu, üretim sırasında yapılacak olan değişikliklerin yararlı olup olmadığının belirlenmesinde ve üretimde kullanılan önemli optimum kontrol ve ayar aralığı parametrelerini belirlemede kullanılır.

Kalite konusunda Japonya'da oluşan gelişmelerle beraber ilk olarak Amerika'da kullanılmış ve sonra başka ülkelere yayılmıştır. Fakat ülkemizde dahil olmak üzere üretim endüstrisinde bu yöntemler olması gereken önemi bulamamaktadır. Deney tasarımının yöntemlerinden biri olan Taguchi yöntemi, 1990'lerden sonra Dr. Genichi Taguchi'nin tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Taguchi bu yöntemle deneme sayısı minum seviyede tutarak çok iyi sonuçları elde etmek amacıyla ortogonal dizinleri kullanmıştır. Ortogonal dizinleri kullanarak deney tasarımı deneylerinde her bir deney için faktör seviyeleri değiştirilmeden, bu seviyelerin eş zamanlı olarak değişmesini mümkün kılar. Bu sayede bir deney için birden fazla adet faktör ve seviyesinin etkisi ölçülebilir. Taguchi yöntemi tarım, kimya ve elektronik alanlarında daha geniş olarak kullanılan deney tasarımı teknikleri son zamanlarda üretim sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır. Taguchi yöntemi sanayi uygulamalarına yeni fikirlerin doğmasına neden olarak üretim sektöründe kabul görmüştür. Taguchi yönteminin amacı kontrol edilebilen faktörleri ayarlayarak zaman ve maliyet yönünden etkin, aynı zamanda

kontrol edilemeyen faktörlere karşı duyarsız davranan ürün ve proses tasarımının yapılmasıdır.

1.2. Literatür Çalışması

Canlı, M.E. tarafından yapılan bu çalışmada, güneş enerjisi depolama ünitesinin performansı Taguchi L9 deney dizilimi ile farklı ebatlardaki tel çapı, yay çapı ve yay adımına sahip yay tipi ısı transferi arttırıcılar, dizilimi oluşturulmuştur. Çıktılar Gri ilişkisel analiz yöntemi ile ergime süresi, iyileştirme oranı, enerji depolama verimi gibi değerleri optimum düzeyde hesaplanmıştır [1].

Gümüškaşık, M. tarafından yapılan bu çalışmada, inşaat sektöründe kullanılan kendiliğinden yerleşen beton fazla çimento içermektedir. Bu yüzden maliyeti yüksektir. Bu maliyeti azaltmak için karışımda bazı atık maddeler kullanılmaktadır. Bu atıkların kül beton karışımından eşit olmayan miktarlarda kullanılarak çimento ile yer değiştirerek kullanımı sağlanmıştır. Bu atıklar ile oluşan betonun mekanik ve fiziksel özellikleri Taguchi metodu yardımıyla optimize edilerek uygun parametre değerleri belirlenmiştir [2].

Özel, B.'nin çalışmasında, Amasya ilinde Yeşilırmak nehri üzerinde yer alan Arşimet türbininin verimi ve hidrolik güç performansını teorik modelleyerek, Taguchi yöntemi ile parametreleri optimize etmiştir. Mikro heslerde Arşimet türbin modeli yüksek oranla kullanılmaktadır. Arşimet türbinlerinde bazı parametreler verim ve hidrolik güç, kanat sayısı, debi, vida uzunluğu, eğim açısı ve sarmal dönüş sayısı değerlere bağlıdır. Belirlenen bu parametreden vida uzunluğu, sarmal dönüş sayısı, debi ve eğim açısı beş adet değişken ile L25 Taguchi deney tasarımı yapılmıştır. Verim ve hidrolik güç değerleri teorik model sayesinde hesaplanarak MINITAB 20 Programında Taguchi analizi uygulanmıştır. Sonucunda ise verimi etkileyen sarmal dönüş sayısı, eğim açısı, vida uzunluğu ve debi parametrelerinin olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyondan önceki verimin %70 iken parametrelerin optimizasyonu sonucunda verimin %89'a çıkabileceği hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda ise hidrolik güç ve verim hesaplanarak, reelde olan veriler ile teorik veriler karşılaştırılmış, verim ile hidrolik güç değerleri hesaplanmıştır [3].

Maherlan, M. F.'nin Nano-Silika ile modifikasyona uğramış uçucu kül içerikli harç karışımlarının mekanik ve su emme yönleri Taguchi tasarım yöntemiyle analizini yapmışlardır. Taguchi tasarım metodu kullanılarak çimento karışımlarında uçucu kül

ve nano-silika kullanılmasının, mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Tasarımı değişken sayısının fazla, deney sayısını minimum olacak şekilde analiz edilmesini sağlayan ortogonal dizi sistemi kullanarak yapılmıştır. Hacim olarak bağlayıcı miktarı, hacim olarak uçucu kül yüzdesi, toplam bağlayıcı hacmine oranla NS yüzdesi ve hacimce su/bağlayıcı oranı olarak dört parametre seçilmiştir. Seçilen bu parametreler için dört farklı seviye belirlenmiştir. Parametreler ve seviyeler ile Taguchi tasarım metodu, L16 ortogonal tasarım dizisi kullanılmıştır [4].

Ramroom çalışmasında Taguchi yöntemiyle farklı UYPB (Üretilen Yüksek Performanslı Beton) karışımları geliştirerek test etmiştir. Bu testler UYPB için yapılan deneysel programların iki durumuna gelmiştir [5].

Seyitnur, A.'nin, Çoklu çarpan jetle ısı transferi ile ilgili tez çalışmasında, geometrilerde ısı alıcılar ile eğimli yüzeylerde çoklu çarpan jet yardımıyla soğutma yapılarak en uygun parametrelerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Optimum parametreler sayesinde endüstri çalışmalarında zaman ve maliyeti minimize ederek Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Soğutma uygulamaları için yapılan deneylerde, Taguchi metoduna sayesinde optimum akış şartları ve optimum ısı alıcı geometrisi parametreleri belirlenmiştir. Bu sayede % 28,61 oranında ısı transferinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir [6].

Tanrısevdi, H.'nin, yüksek lisans tez çalışmasında endüstriyel firesi olan buğday kepeği, çavdar kepeği ile diyet lif üretimi yapılmıştır.

Tanrısevdi, H. tarafından yapılan bu çalışmada, diyet lifinin klasik yöntemlerle üretilme proseslerinde genellikle ultrasound yöntemi kullanılarak optimum seviyede diyet lifi üretim yöntemi gerçekleştirilmiştir. Taguchi yönteminde yer alan deney tasarım modeli ile en iyi parametreler oluşturulmuştur. Bu en uygun parametreler ile lif üretimi yapılmıştır. Uygulanan modelde seçilen kek örneklerine yağ katkı maddesi olarak eklenen liflerin, keklerin tekstürel yapısını etkileyip etkilemediği araştırılmıştır. Buğday ve çavdar kepeği bileşenlerinde yer alan değerli diyet lifleri, çoğu çalışmaya örnek teşkil etmiştir. Çalışmada diyet gıda lifi üretmek için buğday ve çavdar kepekleri kullanarak optimum üretim yöntemi tasarlanmıştır.

Diyet lifi için yapılan üretim yöntemi optimizasyon çalışmasında Taguchi karışık seviye ortogonal dizayn L18(61 x33) faktörler, seviyeler ve kül ölçüm değeri sonuçları bulunarak üretilen lif örneklerinin kül düzeylerine karşılık modelde bulunan

yanıtların değerlendirilmesinde ‘Ω’ dönüşümü kullanılmıştır. Kül etkisinin belirlenmesinde kalite parametresi olarak “en küçük en iyidir” kullanılmıştır.

Taguchi karışık seviye ortogonal dizayn L18(61 x33) modeli, diyet lifi üretiminde kullanılmıştır. Diyet lifinin protein miktarı üzerine kullanılan parametreler olan ultrasound gücü ve devri, süre, pH faktörlerine %95 güven seviyesi istatistiksel analizi yapılmıştır. Sonuç ise kullanılan faktörlerin üretilen diyet liflerinin protein miktarına etkisi olamadığı $p>0,05$ güven seviyesinde görülmüştür [7].

Uran, Y.’nin yapmış olduğu çalışmasında, hafif genleşmiş kil bilyelerinin optimum üretim şartlarını Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir. Performans kriteri olarak genleşme oranı, pişme kaybı, su emme oranı ve tane yoğunluğu belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Organik madde yüzdesi parametresi (0, 1, 2, 3 ve 4), ön ısıtma sıcaklığı (150, 200, 300, 400 ve 500°C), ön ısıtma süresi (1, 3, 5, 7 ve 9 dakika), sinterleme sıcaklığı (1050, 1100, 1150, 1175 ve 1200°C) ve sinterleme süresi (5, 7, 9, 11 ve 13 dakika) alınmış ve tane boyutu tüm deneylerde 250 µm altı olarak sabit seçilmiştir. Bu parametre ve sabit değerlere rağmen organik madde yüzdesi %3, ön ısıtma sıcaklığı 150°C, ön ısıtma süresi 1 dakika, sinterleme sıcaklığı 1200°C ve sinterleme süresi 13 dakika ölçülmüştür. Bu koşullarda, tahmini genleşme oranı %4,34 hesaplanmış, deney sonucunda %4,32 bulunmuştur, pişirme kaybı tahmini değer %30,30 hesaplanmış olup, deney sonucunda %31,63’ bulunmuştur. Ek olarak parametrelerin çıktılar üzerindeki etki yüzdeleri hesaplanmıştır [8].

Şimşek, G.’nin çalışmasında, Nanoliflerin çap değerinin elektrolif çekim yöntemi sayesinde bulunarak, Taguchi yöntemi ile optimizasyon edilmesi hedeflenmiştir. L27 ortogonal tasarım metodu tercih edilerek deneyler uygulanmıştır. Deneylerin sonucunda ortalama ve S/N oranları tespit edilerek, faktörlerin ve seviyelerinin etkileri faktör etkileri grafiksel olarak gösterilmiştir. Nanolif çap değerini en küçük veren optimum kombinasyon bulunmuştur. Varyans analizi yapılarak optimum en küçük nanolif çap değeri hesaplanmıştır [9].

Kılıç, H.’nin bu çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş kompoziterin aşınma özelliklerini belirleyerek kompozitlerin gr cinsinden kayıp ağırlıkları hesaplanmıştır. Aşınma testleri Taguchi yöntemine göre yapılmış partikül oranı ve boyutu, matris tipi, kayma hızı, kullanılan yük ve kayma uzaklığı parametreleri kullanılmıştır [10].

Yaka H. ve Atılgan, R.'nin yaptıkları bu çalışmalarında, delme işlemini nikel tabanlı süper alaşımlı malzemelerde uygulayarak işlem sürecinde farklı parametreleri ve seviyeleri kullanmışlardır. Delme işleminde kaplamalı ve kaplamasız iki ayrı matkap ucu kullanılmıştır. Taguchi yöntemi deneyler yapılmış ve bu deneyler sonucunda, yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün ortalama en küçük değeri kabul edildiği için en küçük sinyal-gürültü değeri seçilerek optimizasyonlar yapılmıştır. Deneylerin sonunda kesme parametreleri ve seviyeleri belirlenmiştir. En ideal parametre seviyelerinin dizilimi $A_2B_3C_1D_3$ bulunmuştur. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkileyen eden parametre kesme hızı bulunmuştur ve çalışmanın varyans analizi sonucu güven düzeyi %84,23 olarak ölçülmüştür [11].

Özden, O. ve Gökçe, B.'nin yapmış oldukları bu çalışmalarında, fonksiyonel ihtiyaçları karşılamak amacıyla bir kara aracı için ana değişkeni temsil etmek üzere şasi uzunluğu, yüksekliği ve genişliği 17 adet değişken parametrik belirlenmiştir. Önden çarpma, yan çarpma ve şasinin burulması gibi durumları için SEA gerçekleştirilmiştir. Taguchi yöntemi ile optimum tasarım parametreleri bulunmuştur. 44.7 MPa optimum önden çarpma konfigürasyonu için 25.62 MPa yan çarpma için ve burulma için 33.66 MPa Von-Mises gerilme değerleri elde edilmiştir. Tırmanabilme eğim açısı 25° , yan devrilme açısı 34° ve ivme sınır değeri 14 m/s^2 olarak bulunmuştur. Aracın emniyetli olduğu ve optimum tasarıma göre üretimi gerçekleştirilmiştir [12].

Şık, A., Akay, A., ve Bingöl, T.'nin yaptıkları bu çalışmada, tasarım değişkenlerini optimize etmek için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntem genel test süresi ve maliyetleri önemli minimize etmektedir. VTM Tozaltı Ark Kaynak Tezgâhında çelik malzemenin (400HBW) kaynak işlemi uygulanmıştır. Bu tezgâhta vidaların kaynağı ve eş zamanda çift taraflı birleştirme işlemleri yapılmıştır. Kaynak genişlik değerleri ölçülmüştür. Deney numuneleri Taguchi yöntemine göre veriler ile sürecin girdi-çıkış bağlantısını kurmak için varyans ve regresyon analizi uygulanmıştır. Bu optimizasyon çalışmasının Minitab programında analizleri yapılmıştır. Optimize edilmiş değerler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda eniyilenmesi değerleri $A_2B_2C_2D_1$ 'de olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak akımı değeri (37,17), kaynak hızı değeri (37,20), elektrot çıkıntısı değeri (37,41) ve ısı girişi değeri (37,23) olarak bulunmuştur. Sinyal-gürültü oranı elektrot çıkıntısı ve ısı girişi en çok

etkileyen faktörlerin olduğu, kaynak akımı ve kaynak hızı ise en az etkilediği görülmüştür [13].

Türkan, B.'nin Taguchi metodunu kullanarak mürekkep püskürtülmesinin optimizasyon analizi başlıklı bu çalışmasında, mürekkep püskürtmeli yazıcılar üzerinde sıvı miktarının fazla olması ve hedef alana ulaşma süresinin en optimum kısa sürede olmasını sağlayacak parametreleri Taguchi yöntemi ile bulmuştur. Giriş hızı, mürekkep ağırlığı üzerindeki en etkili parametre olduğu gözlenmiştir. Metod olarak mürekkep püskürtmeli damlacıkların ağırlık değişimini incelemek için Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır. Mürekkep renkleri siyah, kırmızı ve mavi seçilmiştir. Kanal giriş yarıçapı 0,02, 0,03 ve 0,04 mm ve giriş hızı için 0,2 m/s, 0,4 m/s ve 0,6 m/s seçilmiştir. Ağırlık maksimizasyonu rengi siyah bulunmuştur. Kanal yarıçapı 0,02 mm ve giriş hızı 0,6 m/s saptanmıştır. Optimum parametreler belirlendikten sonra mürekkeplerdeki farklı renklerin değişimi için Comsol programı kullanılarak damlacık akış analizi araştırılmıştır. Yüksek yoğunluk ve viskozitesi olan mürekkeplerin damlacık sıvı miktarlarının çalışmadaki mürekkepten daha yüksek olduğu ve süre olarak hedef alana ulaşmasının daha kısa olduğu saptanmıştır [14].

Hidrojen ile oksijenin elektrokimyasal tepkimesiyle meydana gelen kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren, enerji sistemlerinde kullanılan proton değişimli membran yakıt pili bir sisteme sahiptir. Proton değişimli membran yakıt pili, diğer yakıt pillerine nazaran yüksek güç yoğunluk ve düşük sıcaklıkta çalışması, hızlı ve sessiz oluşu gibi özelliklerinden ötürü taşımacılık sektörü ve roket sanayi ve benzeri birçok sektörde kullanılmaktadır. Kaya, E.'nin bu tez çalışmasında, Taguchi metodu ile yakıt pili performansını optimizasyon ederek güç yoğunluğunu artırmaya çalışmıştır. Bu amaçla Comsol Multiphysics 5.4 yazılımının Yakıt Pilleri & Bataryalar modülündeki hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi ve Ubong vd. ile deneysel simülasyonda doğrulanarak Ji vd. geometrik özellikler dikkate alınmıştır. Proton değişimli yakıt pilinin üç boyutlu modellenerek bağımsızlık hesabı yapılmıştır. Hidrojen, oksijen giriş hızları, gaz difüzyon tabakası (GDT) kalınlığı, membran kalınlığı, anot ve katot elektrot kalınlıkları parametrelili optimizasyonu yapmak için belirlenmiştir. Üç farklı düzey her bir parametre için belirlenmiştir. Taguchi optimizasyon yönteminde, Minitab yazılımı L27 ortogonal dizaynı kullanılmıştır. Belirlenen bu dizaynda 27 farklı analiz Comsol yazılımında gerçekleştirilerek maksimum güç yoğunluğu saptanmıştır. Minitab yazılımında bulunan S/N oranları akebinde optimum dizayn

$A_3B_3C_1D_1E_3F_3$ bulunmuştur. Güç yoğunluğu $0,501 \text{ W/cm}^2$ değeri elde edilmiştir. Optimizasyondan önce $0,44192 \text{ W/cm}^2$ olan güç yoğunluğu %13,37 oranında artışı gözlenmiştir. Performansı en çok etkileyen parametreler ile güç yoğunluğu sonuçları saptanarak regresyon ve varyans analizi yapılmıştır. Birinci sırada %82,81 ile membran kalınlığı bulunmuş, %5,8 ile GDT kalınlığı ikinci sırada bulunmuştur. Yüzde olarak embran kalınlığının büyük bir orana sahip olduğu görülmüştür, diğer parametrelerin oranları düşük olduğu gözlenmiştir. Hidrojen giriş hızı parametresinin değeri %0,0004 olarak hesaplanmış diğer parametrelere göre etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir. Tahmini güç yoğunluğunun ve analiz sonuçları arasındaki ortalama sapmanın, regresyon denklemi ile L27 ortogonal dizaynı için %0,56 olarak hesaplanmıştır [15].

Çevre dostu Portland çimentolarına alternatif olabilecek üçüncü nesil çimento olarak görülen geopolimerler, dayanıklılık ve mekanik özelliklerinin yüksek oluşu ve düşük karbondioksit emisyonu sayesinde ürün olarak çevre dostu görülmektedir. Aynı zamanda geopolimerler, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi maddeler endüstriyel yan ürünleri olup geri dönüşümü yapılarak yeniden kullanılması, CO emisyonunu azaltması hem çevreye fayda hemde ekonomik fayda sağlamaktadır. Liban, R.İ. tarafından yapılan bu çalışmada, geopolimer harçların özelliklerinin belirlemek için harç numuneleri hazırlanmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali aktivatör, numunelerde doğal zeolit, C sınıfı uçucu kül ve toz kalker bağlayıcı olarak seçilmiştir. Taguchi yöntemi sayesinde bağlayıcı miktarı, aktivatör/bağlayıcı oranı, NS/NH oranı ve sodyum hidroksitin molaritesi ile zeolit bazlı geopolimer harç bileşenlerinin optimum karışım oranları belirlenmiş ve diğer karışımlarda bu oranlar kullanılmıştır. Uçucu kül, kalker ve uçucu kül-kalker, optimum karışım oranlarını bulunan katkı maddesi zeolit bazlı geopolimer harçlarının yerine seçilmiştir. Geopolimer harç numuneleri 24 saat fırınlanarak 80°C santigrat derecede kür edilmiş, akebinde test yapılacak güne kadar oda sıcaklığına bırakılmıştır. Özgül ağırlık, birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, kapilarite katsayısı, 7 gün, 28 gün ve 90 gün olacak şekilde, basınç ve eğilme dayanımları, donma-çözülme, ıslanma-kuruma, sülfat ve asit dirençleri gibi geopolimer harç numunelerinin özellikleri kürleme işleminden sonra yapılmıştır. SEM ve EDS analizleri ile geopolimer harçların mikroyapısı incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, 7. gün, 28. gün 90. gündeki eğilme ve basınç dayanımlarına göre bütün karışımlardaki en yüksek değerler olan toz kalker içerikli

geopolimer, doğal zeolit, uçucu kül hazırlanmıştır. %20 içerikli uçucu kül ve toz kalker geopolimer harçlarda optimum basınç dayanımı (31.8 MPa) ölçülmüştür. Eğilme dayanımı 7.5 MPa ölçülmüştür. Uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer en iyi numuneler olduğu gözlemlenmiştir. Katkı maddesi toz kalker kullanıldığında su emme ve boşluk oranında artış olduğu, uçucu kül kullanıldığında ise su emme ve boşluk oranı azalma olduğu gözlemlenmiştir. Toz kalker içeren harçlarda kapilarite katsayısında artma olurken, uçucu kül içeren harçlarda ise kapilarite katsayısında azalma olduğu görülmüştür. Geopolimer harçlarda bu durum fayda sağlamaktadır [16].

Kimyasal solvent olarak Klorlu solventler çoğu yerde kullanılmaktadır. Tetrakloroetilen klorlu bileşikler arasında yer alır ve genellikle tehlikeli atık alanlarda bulunur. Tetrakloroetilen gibi klorlu çözücüler toprakta uzun zaman kaldıkları için toprağı kirletme özelliğine sahiptir. Sonuç olarak toprağı temizleme maliyeti ve zamanı artırmaktadır.

Kasap, S.'nin bu çalışmasında, toprakta olan klorlu solvent tetrakloroetilenin ıslahı, üç ayrı temizleme kimyasal cinsi kullanarak yıkama hızı seviyesi ve temizleme kimyasal konsantrasyonu incelenmiştir. Temizleme kimyasal cinsi Tween 80, Metil beta siklodekstrin ve Sodyum dodeksil sülfat seçilmiştir. Yıkama hızı 2 cm/sa, 6 cm/sa ve 10 cm/sa, kimyasal temizleme konsantrasyonları %2,5 ve % 6,25 ve %10 alınmıştır. Taguchi yöntemiyle üç seviyeli üç kontrol faktör, L9 ortogonal dizisi tercih edilmiştir. Elde edilen deney değerleri analiz edilerek (S/N) oranı bulunmuştur. Bu oran hesaplanırken performans kriterine bakılmıştır. Küçük olan değer daha iyi diye seçilmiştir. Parametreler için optimal sonuçlar bulunmuştur ve bütün kontrol faktörleri göz önüne alınarak tetrakloroetilenin ıslah performansına olan önemli etkileri, varyans analizi yapılarak belirlenmiştir. Böylece Taguchi ve Yapay sinir ağları ile verilerin karşılaştırılması ve test edilmesi sağlanmıştır. Deneysel verilerin tahmin etme konusunda her iki yönteminde başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Taguchi yöntemi ile temizleme kimyasal türü olarak DNAPL-PCE kütlesinin çıkarılması ıslah süresi bakımından optimizasyonu bakımından en önemli faktör olduğu görülmüştür.

Yıkama hızında en azetki eden faktördür. ANOVA analiz değerleri ile bütün parametrelerin deneysel sonuçlar üzerinde önem arz ettiği ve deneysel girdilerin %97,94, %98,53 ve %97,15'ini açıkladığı gözlenmiştir. Taguchi metoduyla S/N oranına göre ıslah performansını minimize edecek parametre; TWEEN 80 (temizleme kimyasalı), kimyasal konsantrasyonu faktörü (%10) ve yıkama hızı faktörü (6cm/h)

olduğu gözlemlenmiştir.Beş kez tekrar ederek elde edilen sonuçlar ile Taguchi yöntemiyle bulunan tahmün sonuçları karşılaştırılmıştır.Kıyaslama yapıldığında Taguchi ile elde edilen tahmin değerlerinin doğrulama deneyi değerlerine yakın olduğu gözlenmiştir.İkinci aşamada Matlab® programı ile yapay sinir ağı oluşturularak Taguchi Metodundaki 27 veriden 18'i eğitim için, 9'u testte kullanılmıştır [17].

Kurt, Ü. ve Önbilgin, G.' nin yapmış oldukları bu makale çalışmasında iki farklı tasarım optimizasyonu yapılmıştır.Etkin bir tasarım modeli ile etkili makine geliştirmek amacıyla deneysel tasarımın Taguchi yöntemi uygulanmıştır.Sonlu elemanlar yöntemiyle alan hesaplamaları yapılmıştır.Birinci uygulamada makineye ait üç dereceli dört faktör seçilmiştir.Hava aralığı magnetik akısını en yüksek değerde olacak şekilde optimum edilmiştir.Hava aralığı magnetik akısı sonlu elemanlar ile hesaplanarak ANOVA ile optimum faktör dereceleri seçilmiştir.Tasarımdan önceki referans ve optimize edilmiş modelin akı eğrileri karşılaştırılmıştır.İkinci uygulamada iki dereceli yedi ayrı faktör L-8(27) Taguchi yöntemiyle bulunarak Regresyon denklemi oluşturulmuştur.Sonuç olarak deneysel tasarım olan Taguchi yaklaşımı elektrik makinaları tasarım modeli geliştirmek için çok faydalıdır.Alan çözümlemeleri için kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanan ile deneysel tasarımı beraber kullanmak tasarım sürecini oldukça kısaltacak ve etkin hale getirecektir [18].

Doğdu, G. ve Şen, N., E.'nin çalışmalarında, Türkiye'nin Bolu ilinde yer alan Hindi kesimhane tesisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hindi kesimhanesinde üretim sonucu oluşan hindi atık suyunun fotokatalitik bozunması, Taguchi yönteminde (RSM) uygulanarak araştırılmıştır. Hindi kesimhane ünitesinden alınan numuneler ışıktan görmeyen, kapalı amber plastik numune şişelerine konularak, +4°C'de buzdolabı ortamında korunmuştur. Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak fotokataliz performansını etki eden parametreler optimize edilmiştir. L16 (43x22) ortogonal dizilimi kullanarak, 3 bağımsız 4 seviyeli ve 2 bağımsız 2 seviyeli olarak toplam 16 deney seti ve 5 bağımsız faktörü yer almaktadır. Bu faktörler ise; pH, H₂O₂, lamba türü, katalizör türü, katalizör konsantrasyonu olarak belirlenmiştir.

(0,5-3 g/L, A) fotokatalizör konsantrasyonu, pH (2-10, B), hidrojen peroksit (H₂O₂) konsantrasyonu (0-20 mmol/L, C), lamba türü (UVA, UVC, D) ve katalizör tipi (Ti O₂, ZnO, E) optimizesi yapılmıştır. Deneysel faktörler karışık seviyelerde (43 2 2) araştırılmış ve L16 testleri yapılarak parametrelerin optimizesi gerçekleştirilmiştir.

ANOVA test sonuçlarına göre KOİ gideriminde kullanılan en önemli parametreler; katalizör, H_2O_2 konsantrasyonu ve pH olduğu gözlemlenmiştir. Optimum şartlar ise; Seviye 1, başlangıç katalizör miktarı 0,5 g/L, pH 2 (Seviye 1), H_2O_2 konsantrasyonu 10 mmol/L (Seviye 3), lamba tipi UVA (Seviye 1) ve katalizör cinsi ZnO (Seviye 2) olarak tespit edilmiştir. KOİ giderim verimleri ise %62 ve %63 ölçülmüştür. Tesisteki en önemli maliyet faktörünün elektrik enerjisi tüketimi olduğu görülmüştür. Kimyasal enerji maliyeti optimum şartlar altında 1.315 TL ve elektrik enerjisi maliyeti optimum şartlar altında ve 32.325 TL olduğu hesaplanmıştır [19].

Kahraman, H., İdris, C., Eren, B., Çoban, A.'nin yapmış oldukları çalışmada, dizel yakıtına göre biyodizel yakıtın segman-silindir çifti arasındaki sürtünme, aşınma davranışlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Taguchi yöntemi ile optimum şartları sağlayan, sürtünme ve aşınma deney parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler belirlendikten sonra deneysel çalışarak dizel ve biyodizel yakıtlarının tribolojik özelliklerini araştırmıştır. Son olarak segman-silindir çifti arasındaki meydana gelen aşınma mekanizması yapay sinir ağları ile modellenmesi yapılmıştır. Çalışmanın sonunda biyodizelin sürtünme katsayısının dizel yakıtına göre daha düşük olduğu ve bu yüzden aşınma miktarında az olduğu saptanmıştır. Optimum şartları biyodizel yakıtı 150d/d ve 40 N yük ile elde edilip yapay sinir ağlarında model tahmini yapılmıştır. Böylece deney sayıları azalacak, segman-silindir çiftinin tribolojik özellikleri araştırılacaktır. Taguchi yöntemi ile aşınma miktarları optimum olmasını sağlayan parametreler tespit edilmiştir [20].

Kafkas, F., Gürbüz, H., Şeker, U.'nin yaptıkları çalışmalarında, Taguchi yöntemi ile AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalama işleminde yüzey bütünlük özellikleri değerlendirmiştir. Bu amaçla CNC tornada ortogonal dizili L18 (21x33) deneysel tasarımı kullanılmıştır. Varyans analizi için (ANOVA) kullanılmıştır. Analiz ile parametrelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü, pekleşme miktarı ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri gibi etkiler araştırılmıştır. Dört adet işleme parametresi olan kesme derinliği, kesici takım geometrisi, kesme hızı ve ilerleme oranı seçilmiştir. Bu parametrelerin kalite olarak etkilediği gözlenmiştir. Kesme derinliği parametresinin, ortalama yüzey pürüzlülüğüne kısmen etkilediği, takım geometrisinin ise etkisinin olmadığı görülmüştür. Etki derecesi yüksek olama sırasına göre, sertleşme derecesinin, kesme hızının, pekleşme derecesinin etkili olduğu görülmüştür. En yüksek etkiye sahip ilerleme hızı olduğu görülmüştür.

ANOVA ile yapılan varyans analizi sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre %79.60 oranıyla ilerleme oranı olmuştur. Takım geometrisi %37.67 oranla, ilerleme oranı % 30.11 oranla ve kesme hızı %24.97 oranla çevresel yüzey kalıntı gerilmelerine etki eden parametrelerdir takım geometrisi .Takım geometrisi %33.48 oranla, kesme hızı %31.77 oranla ve ilerleme oranı % 25.69 oranla eksenel yüzey kalıntı gerilmelerinde etkileri olmuştur. %44.17 oranla takım geometrisi, ilerleme oranı %24.96 ve kesme hızı %22.95, pekleşme derecesi üzerinde etkilidir. Takım temas uzunluğuna etki eden bütün parametreler yüzey bütünlüğünü de etkilediği görülmüştür. Doğrulama test sonuçlarına göre, %95 güven aralığı içerisinde en ideal kombinasyonların %53.90 pekleşme derecesinde, % 20.39 ortalama yüzey pürüzlülüğü, %5.61 eksenel yüzey kalıntı gerilmesinde ve ϕ % 1.89 oranıyla evresel yüzey kalıntı gerilmesinde iyileşme gözlenmiştir.

Sac-metal şekillendirme tekniği, sac levhalara desenlerin basılmasında sık kullanılan bir yöntemdir. Fakat desenlerin basımı esnasında yöntem doğru seçilmezse ve proses parametreleri optimize edilmezse, sac yüzeylerinde aşınma ve çizilmeler olduğu görülmektedir. Buda istenilen kalite sağlanmamış olur ki müşteri memnuniyeti açısından olumsuz bir durum oluşturur. Levhalarda oluşan deformasyonları düzeltmek için plastik tampon zımbalar kullanılmaktadır. Sac levhalara istenilen desenlerin basılmasını sağlayan proses parametreleri; plastik tampon kalınlığı, plastik tampon sertliği, zımba basıncı gibi parametrelerin optimizasyonu yapılmalıdır [21].

Kılıç, S., Önen, S.K., Aslandağ, A., Koca, S., Ömer, S.'nin çalışmalarında, alüminyum ve çelik levhalar üstüne plastik tampon aracılığıyla desenlerin basılması ve proses parametrelerinin optimizasyon işlemidir. Yapılan optimizasyon sonucunda en etkili faktör zımba basıncı olduğu görülmüştür. Tampon zımba kalınlığı, desen açısı ve malzeme cinsi parametrelerinin zımba basıncını sırayla takip ettiği gözlenmiştir. Tampon zımba sertliği parametresinin malzeme kalınlığına önemli etki etmediği görülmüştür. Taguchi yaklaşımı kullanarak L8 ortogonal serisinin daha ideal olduğu görülmüştür. L8 ortogonal serisi baz alındığında 8 tane deney belirlenmiştir. Buna göre 6 faktör 2 seviyeleri dikkate alındığında 64 tane denemenin yapılması gerekirken, Taguchi yaklaşımı sayesinde deney sayısı 8'e düşmüştür. Bu sayede deney maliyeti önemli ölçüde azaltılmıştır [22].

Fedai, Y.'nin çalışmasında, AISI 4140 çeliğinin Frezelenme prosesi sonrası çıktı parametreleri yüzey pürüzlülükleri olan üç farklı değeri ve işleme süresini en düşük

dseyide tutmak, talaş kaldırma oranını en yüksek seviyede tutmak ve kontrol faktörlerinin etkisinin incelenmesidir. Kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme parametreleri çalışmada yer alan kontrol faktörleridir. Taguchi'nin L9 tasarımına göre deneyler yapılmıştır. Çok yanıtlı optimizasyon yaklaşımı olan (Taguchi-DEAR), çoklu kalite karakteristik optimizasyonunu gerçekleştirmek için kullanılmıştır. En yüksek etkiye kesme derinliği talaş kaldırma oranı olduğu gözlenmiştir. Proses parametrelerinin optimum değerleri $A_3B_3C_3$ şeklinde, kesme hızı 325 m/dak, ilerleme 0,16 mm/dev ve kesme derinliği 1,5 mm olarak ölçülmüştür ve Taguchi yöntemi ile doğrulama deneyleri yapılarak yüzey pürüzlülükleri sırasıyla, 0,51 μm , 2,3 μm , 0,90 μm çıkmıştır. Tm: 4,11 dakika değerleri bulunmuştur [23].

Türkan, B.'nin bu makale çalışması, termal enerjiyi mekanik yada elektrik enerjiye dönüştürmek için iki türbin kullanarak, Taguchi metodu ile optimizasyonu yapılmıştır. Kullanılan parametreler, türbin giriş basıncı P1 çevrim ara basıncı P2 ve akışkan oranı PC3'tür. Giriş basıncı türbin için 3 farklı değer 1000 kPa, 1200 kPa ve 1311 kPa, alınmıştır. Çevrim ara basıncı için 3 farklı değer 300 kPa, 350 kPa ve 400 kPa alınmıştır. Aktarılan akışkan oranı için 30, 35 ve 38 alınmıştır. Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Minitab programı ile 9 farklı değer kullanarak, Taguchi analizi yapılmıştır. Analizler termodinamiğin birinci kanunu ve ikinci kanununun verimi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Türbin giriş basıncı en etkili parametre olduğu gözlenmiştir. %70.23 1. kanun için, %72.38 2. kanun için ölçülmüştür [24].

Baynal ve Aksu tarafından yapılan çalışmada, Taguchi Yöntemi ile Shainin Metodu'nun uygulaması yapılmıştır. Shainin Yöntemi ile Taguchi Yöntemini karşılaştırarak varyasyonda %70 oranda iyileştirme yapıldığını ispat etmişlerdir [55].

Bayrak ve arkadaşları çalışmalarında Taguchi Yöntemi'ni uygulamışlardır. Dörder seviyeli, beş adet kontrol edilen faktörler ile deney yapmışlardır [25].

2009 yılında Motorcu tarafından yapılan çalışmada, kesme parametresi ve takım sertliklerinin takım ömrünü ve aşınması üzerine etkisini incelemiştir [26].

Göloğlu ve Mızrak tarafından yaptıkları çalışmada, deney tasarımı sayesinde müşterinin ihtiyaçlarına göre ürünün belirlenmesini sağlamışlardır. Bulanık Mantık ve Taguchi Yöntemi kullanılarak, müşterinin kendi ihtiyaçlarına göre ürün belirlenmiştir [27].

Altın 2013 yılında yaptığı çalışmasında, kesme hızının ve kesici takım kaplama malzemesinin, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemiştir. Çok yanıtı Taguchi tasarımını kullanarak sonuçlarını varyans analizi ile incelemiştir [28].

2013 yılında Aslan ve arkadaşları, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler ile farklı seviyeleri üzerine Taguchi Yöntemi'ni uygulamışlardır. Kesme hızı, ilerleme hızı ve kesici uç yarıçapı dikkate deney sonuçları değerlendirilmiştir [29].

2019 yılında Cabir tarafından yapılan bu çalışmada, Taguchi Yöntemi'ne ait 16 adet deney girdilerini ve çıktıları YSA'na öğretmek, Taguchi sonuçları ile YSA ve gerçek deney sonuçların tahminleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada 32 adet deney yapılmıştır ve %95'e yakın oranda model tasarımının uygun çıktığı tespit edilmiştir [30].

2005 yılında, Wu ve arkadaşları Taguchi'nin S/G oranını kullanarak, dinamik özelliklerini araştırmak için quartz gaz sensörü sistemi üzerinde çalışma yapmışlardır. Zaman ve maliyet yönünden verimli Sonlu Elemanlar Analiz 16 Yöntemi'ni kullanarak, depolanmış kütlenin quartz biyosensörünün rezonans frekansı çıkışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Taguchi Yöntemini bilgisayar simülasyonu ile adephe etmişlerdir. Sonucunda ise değişkenlik azalırken hassasiyet artmıştır [31].

2009 yılında Tsai ve arkadaşları çıktı yanıtı ve girdi sinyali arasında doğrusal ilişkisi olan yüzeysel akustik dalga gaz sensörü sistemi için Taguchi S/G oranını kullanarak dinamik özelliklerini eniyilemişlerdir. Çalışma sonucunda ise değişkenlik azalırken ölçüm sisteminin hassasiyeti artmıştır [32].

1997 yılında Lunani ve arkadaşları S/N oranını kullanarak dağılma etkisinde yapılan tek hatanın birçok hataya neden olduğunu ispatlatmışlardır. Dağılma ve duyarlılık etkilerinin arasındaki etkiden kaçınmak için iki grafik metot tasarlamışlardır [33].

Tan ve ark., çimento bileşenli harçlarda bulunan silis dumanı, bentonit ve uçucu kül parametrelerinin optimizasyonu ve etkilerini gözlemlemek için Taguchi metotunun üç faktör ve dört seviyesinde L16 ortogonal dizisinden yararlanmışlardır. Deneye katılan faktörler ve değerleri ise, bentonit değeri %0, %0.5, %1, %3 uçucu kül değeri (%10-20-30-40) ve silis dumanı değeri %0, %5, %10, %20 olarak belirlenmiştir. Su/katı oranları 0.75 ve 1.0 olan iki harç için bentonit %3, uçucu kül %10 ve silis dumanı %20 değerleri minimum gerekli optimum şartlar elde edilmiştir. Su/katı oranı 1.25, bentonit oranı %3, uçucu kül %20 oranında ve silis dumanı %20 oranında elde edilmiştir [34].

Türkmen ve ark., Taguchi yöntemini yüksek dayanımlı beton karışımlarında meydana gelen kimyasal faktörlerin sebep olduğu zararı ölçmek için deneyler yaparak, en dayanıklı beton karışımını elde etmek için gerekli optimum şartları belirlemişlerdir. Çalışmada dört seviyeli, beş faktörlü standart L16 dizisini kullanmışlardır. Sonucunda %10 silis dumanı ve %5 yüksek fırın cürufu en dayanıklı harç karışımı olduğunu gözlemlemişlerdir. Karışımın su/bağlayıcı oranını 0.30 olarak heasplayarak, 120 gün süre zafında kireçli suda kürlemişlerdir [35].

Olivia ve Nikraz çalışmalarında, uçucu kül geopolimer karışımlarından oluşan betonun dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini araştırmak için Taguchi yöntemini uygulamışlardır. Tasarımda Taguchi standardının L9(34) ortogonal dizisini kullanarak, 1800-1848-1896 kg/m³ agrega içerikli, (0.3-0.35-0.40), alkali çözelti/uçucu kül oranı, 1.5-2-2.5 sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı, kürleme yöntemi 24 saat 60 °C -12 saat 70 °C -24 saat 75 °C incelenmiştir. Sonucunda 28 günlük 55 MPa basınç dayanımı olan geopolimer beton Taguchi yöntemi sayesinde üretilmiştir [36].

Riahi ve ark., çalışmalarında Taguchi metodu ile 2 günlük ve 7 günlük kül bazlı geopolimerlerde basınç dayanımını araştırmışlardır. Üç faktörle yapılan bu çalışmada, fırın kürleme sıcaklığını (25-70-90°C), fırın kürlenme süresini (2-4-8 saat) ve sodyum hidroksit konsantrasyonunu (5-8-12 M) alarak, L9 Taguchi dizisini kullanmışlardır. En yüksek basınç dayanımı için optimum fırın kürleme sıcaklığı 90°C alınmıştır. Numunelerin hepsinde orta konsantrasyona sahip hafif sodyum hidroksit kullanarak optimum basınç dayanımına ulaşılmıştır [37].

Hadi ve ark., Geopolimer betondaki en iyi karışım oranlarını hesaplamak için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Bağlayıcı içeriğinin (Al), alkali aktivatörün bağlayıcı içeriğine (Bi) oranını, sodyum silikatın (SS), sodyum hidroksite (SH) oranını incelenmiştir. Geopolimer beton içerisinde sodyum hidroksit konsantrasyonu araştırılmıştır. Toplamda dokuz karışım incelenmiştir. Numune sonuçları 450 kg/m³ bağlayıcı içeriği, 0.35 Al/Bi oranı, 2.5 SS/SH oranı ve 14 M SH konsantrasyonu ve 7 günlük basınç dayanımını ise 60.4 MPa olduğu gözlemlenmiştir [38].

Wu ve ark., Bir motorun yanma özelliklerini araştırmak için dizel, biyodizel ve sıvı petrol gazı karışımlarını kullanarak, optimum faktörleri Taguchi yöntemi ile belirlemişlerdir. Farklı yüklerle deneyler 1500 rpm'de yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, Taguchi yöntemi sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu

olduğunu görmüşlerdir. Böylece bu çalışma sayesinde deneysel çalışma sayısında azalma olacağı görülmüştür. Özgül yakıt sarfiyatı ve NO_x emisyonları sonuçları optimum %40 LPG (B3), B10 (A1) ve %20 EGR olarak hesaplanmıştır [39].

Ganapathy ve ark., Jatropha biyodizel ile çalışan motorun motor tasarımını ve termodinamik analizinde optimum parametreleri belirlemişlerdir. Motor performansı ve ısı yayılımı için çift Wiebe katsayılı bir model kullanılmıştır. On tane önemli parametre seçilmiştir. Motorun test sırasını belirlemek için lineer grafik teorisi ile Taguchi metodu L16 ortogonal dizisi seçilmiştir. Sinyal-gürültü oranı (SNR) 'yi kullanmışlardır. En etkili parametrenin sıkıştırma oranının olduğu görülmüştür. Sonraki en etkili parametrelerin difüzyon yanmadaki ısı yayılımı miktarı ve difüzyon yanma süresi olduğu saptanmıştır [40].

Tan ve ark., Biyodizel üretim sürecinde optimizasyon yapmak için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarını transesterifikasyon yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Üretim prosesindeki etkili parametreleri katalizör konsantrasyonu, reaksiyon sıcaklığı, molar oran ve reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir. En etkili parametrenin reaksiyon sıcaklığı olarak bulunmuştur [41].

Huang ve ark., Piston üretim süreçlerinde kalite iyileştirme amacıyla Taguchi yöntemi, genetik algoritma ve yapay sinir ağları deneysel modellerini kullanmışlardır. Taguchi modeli diğer modellerden daha iyi çıkmıştır [42].

Chate ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada çoklu performans ölçümlerini içeren problemlerin çözümü için çoklu yanıt optimizasyonunu kullanmışlardır. Süreç parametrelerinin seçiminde bu yöntem sayesinde sonuca ulaşılmıştır [43].

Shankar ve arkadaşları çalışmalarında proses parametrelerinin optimizasyonu için ağırlık atama yöntemi, Gri ilişkisel analiz (GRA), İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği (TOPSIS), Taguchi- DEAR analizi çok yanıtlı optimizasyon algoritmaları kullanmışlardır [44].

Moganapriya ve arkadaşlarının bu çalışmalarında, AISI 420 martensitik paslanmaz çeliği işleme sürecinde parametrelerin optimizasyonu için Taguchi-DEAR yöntemini uygulamışlardır. Çeliğin kuru tornalanması prosesinde kesme koşullarının en ideal yöntemi belirlenmiştir. Sert kaplama malzemesi geliştirmek için Titanyum Alüminyum Silisyum Nitrür (TiAlSiN) bu çalışmayı gerçekleştirmişlerdir [45].

Vaddi ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, DEAR yöntemiyle işlem parametreleri olan talaş kaldırma oranı (MRR), takım aşınma oranı (TWR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR), performans özellikleri gibi parametrelerin optimizasyonunu sağlamışlardır [46].

Reddy ve arkadaşı, Taguchi-DEAR yöntemini çok kriterli karar vermede optimal işleme parametrelerini bulmak için uygulamışlardır. Malzeme kaldırma hızı üzerinde en yüksek etkiye sahip işlem parametresi ilerleme hızının olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonucunda MRR ve SR için %16.64 ve %4 oran artırılmış değer ile uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. [47].

1.3. Çalışmanın Önemi

Bu çalışmada daha önce gerçekleştirilen, “Termoreaktif difüzyon yöntemiyle çeliklerin demir alüminid kaplanması” adlı yüksek lisans tez çalışmasında gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılmıştır. Yapılan bu tez çalışmasında, 22 mm çapında, 5 mm kalınlığında AISI D2 çelik çubuk kesilerek, metalografik koşulları sağlandıktan sonra, 700°C, 800°C ve 900 °C sıcaklıklarında, 1, 3 ve 5 saat sürede, saf alüminyum, alümina, amonyum klorür ve naftalinin toz karışımında termokimyasal işlemleri ile demir alüminid kaplamaları prosesi gerçekleştirilmiştir. Termokimyasal işleme tutularak kaplanan numune yüzeyi, kaplama sıcaklık süresi, sertliği, kaplama kalınlığı, kırılma tokluğu gibi kontrol faktörlerinin analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarındaki parametreler, çok yanıtli optimizasyon yaklaşımı olan Taguchi yöntemi ile, Taguchi'nin L9 tasarımına göre deneyler yapılmıştır ve çoklu kalite karakteristik optimizasyonunu sağlamak için parametreler optimize edilmiştir. Proses parametrelerinin optimum değerleri ise; en dış yüzeyinden 15 mikrometre uzaklıkta, 5 gram yük altında sertliği 350-480HV, kaplama kalınlığı 35-346 µm, kırılma tokluğu 0,7-2,87 MPa.m^{1/2} olarak ölçülmüştür.

Mühendislik analizlerinin çoğunda, Taguchi yöntemi geniş ölçüde kullanılmaktadır. Frezeleme, yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma, kesme kuvveti, işleme zamanı ve titreşim gibi işlemlerde maliyet, performans ve faktörlerinin optimizasyonu için önemli bir yol izler [48]. Taguchi metodunun uygulanmasının nedeni, en az deney yaparak zamandan tasarruf etmek ve böylece maliyeti düşürmek, kaliteyi arttırarak, tasarım parametrelerini optimize etmektir [49].

Ürün tasarımına odaklanarak kaliteyi sağlamak, kaliteyi kontrol ile sağlamaya göre daha kolaydır [50].



2. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIM YÖNTEMLERİ

2.1. Deney Tasarımının Tarihsel Gelişimi

Regresyon Analizi temeline dayanan, bağımsız girdi değişkeni olan, sebep ve bağımlı çıktı değişkeni sonuç arasındaki ilişkiyi matematiksel açıklayan tekniktir. Bu teknik, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin sayılabildiği durumlar için geçerlidir. Regresyon analizi değişkenlerin sayılabilir olmadığı durumlar için uygulanamaz [51]. Amaç sebep ve sonuç ilişkisini açıklamak için deney tasarımı teknikleri kullanılır [52].

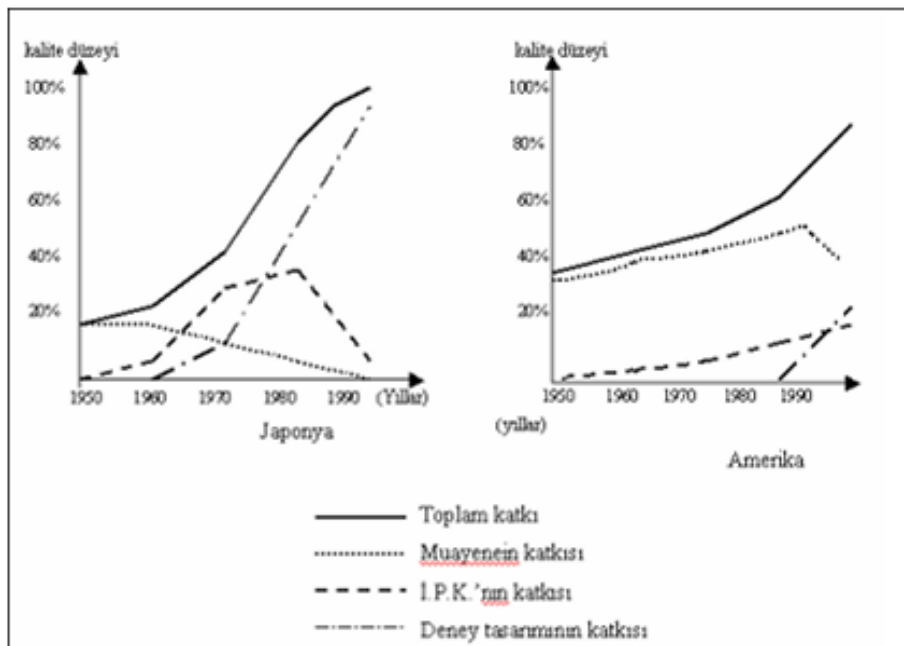
İlk olarak 1920’lerde deney tasarımı İngiliz istatistikçi A. Ronald FISHER açıklamıştır. Tarım ürünlerinde verimliliği arttırmak amacıyla kullanılmıştır. Fisher, bu yöntemi tarım ürünlerinin verimini arttıran gübrelerin tespit etmek için kullanmıştır. Bu tekniği uygularken, toprak verimliliği aynı olan ürünleri bloklara ayırmış ve rasgele bu bloklara çeşitli ürünleri yerleştirmiştir. Bloklar kurup bu bloklara rastgele ürünleri yerleştirerek yetiştirmesi, deney tasarımının temellerini atmıştır ve faktöriyel analiz kavramının ortaya çıkmasına neden olmuştur. “Varyans Analizi” yöntemini deney verilerinin analizini yapmak için geliştirmiştir [53].

Varyans analizi deneysel tasarımın temelini oluşturmaktadır bu metot araştırması yapılan grupların ortalama performansları arasındaki farklılıklarını göstermek için kullanılan bir yöntemdir. Fisher tarafından 1930’lu yıllarda varyans analizi geliştirildiği için yöntemin adı, Fisher ‘ın ismiyle alakalı olarak ‘F’ testi diye bilinmektedir. Bu yöntem daha sonra Amerika’da tarım alanında uygulanmıştır. Bu sayede tarım sektöründe üretimin gelişmesine katkı sağlamıştır [54].

1950’li yıllara kadar deney tasarımı yönteminin teknolojik alanlarda uygulanması yavaş ilerlemiştir. Kimya ve ilaç sektörlerinde bu yöntem kullanılsa da, imalat sektöründe 1970’li yıllara kadar kullanılması kısıtlı kalmıştır. Kalite ve verimlilik yöntemleri üzerine W. Edwards Deming Japonya’da konferanslar vermeye başlamıştır. Daha sonra bu teknikler Japon istatistikçiler tarafından uygulanmaya başlanmıştır.

Deney tasarımı yöntemleri düşük maliyetle yüksek kalitede ürün elde etmek için geliştirilmiştir. Fisher’in uyguladığı ilk deney tasarımlarının ardından Taguchi kendi yöntemlerini ortaya koymuştur [55].

Motorola firmasının K. Bhote tarafından, kalitede kullanılan üç istatistiki yöntemi, 1950 ile 1990 yılları için ABD ve Japonya için kıyaslamasını yapmıştır. Muayene, istatistiksel proses kontrol ve deney tasarımı yöntemleri kaliteyi gerçekleştirmek için kullanılan yöntemlerdir. Bu üç yöntemin bir karşılaştırılması Şekil 2.1.'de yapılmıştır. Şekil 2.1.'e bakıldığında Japonya'daki kalitedeki gelişmeyi, 1970'den sonra deney tasarımı yöntemi olduğu görülmektedir. Kaliteyi gerçekleştirmek için Japonya'da, 1960'lardan beri kullanılan deney tasarımı yöntemi, ABD'de 1980'lerin başlarında Taguchi'nin Amerika'da vermiş olduğu seminerlerden sonra olmuştur. Amerika'daki imalat sektörü 1980'lerin başında üretimdeki uygulamalarda kabul edilmiştir [55].



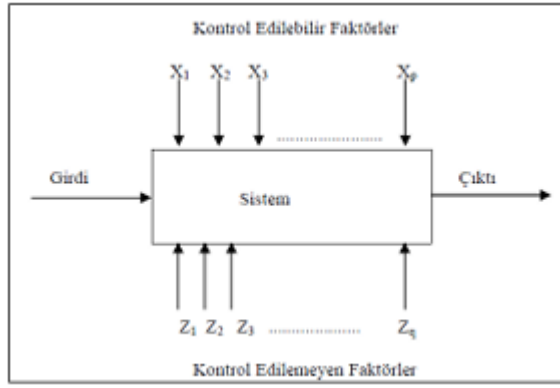
Şekil 2.1. Kalite yöntemlerinin karşılaştırılması [8]

2.2. Deney Tasarımı Yöntemi

Deney tasarımı, süreçteki ilgili kontrol edilebilir değişkenleri değiştirerek, süreç performansını etkileyecek değerleri bulmak için kullanılan bir yöntemdir [53].

Deney Tasarımı, süreçteki girdi değişkenlerine yapılan değişiklikler ile cevap değişkeni üzerindeki meydana getirdiği değişiklikleri gözlenmesi ve yorumlanmasıdır [56].

Şekil 2.2.'de bir sürecin genel modeli çizilmiştir. $X_1, X_2, \dots$, süreç değişkenlerini, X_p kontrol edilebilir değişkenleri ve kontrol edilemeyen değişkenleri $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$ tanımlar [57].



Şekil 2.2. Sistem veya süreç şekli [11]

Bu yöntem süreç geliştirmek için uygulanması halinde sağlayacağı faydalar aşağıda sıralanmıştır [58];

1. Etkili olan değişkenlerin tanımlanması,
2. Değişkenlerin belli bir aralıkta çeşitli etkilerinin hesaplanması,
3. Mevcut sürecin daha iyi anlaşılması,
4. Etkenlerin ve etkileşimlerin karşılaştırılması.
5. Süreç çıktılarının iyileştirilmesi,
6. Değişkenlerin azaltılması,
7. Geliştirme süresinin azaltılması,
8. Toplam maliyetin düşürülmesi.

2.3. Deney Tasarlanırken Süreçte Kullanılan Genel Kavramlar

Deneyin tasarımı yapılırken incelenecek olan değişkene etki eden faktörlerini ve düzeylerini doğru belirlemek gerekir. Bu değişkenlerin hangisinin kontrol edileceği, hangisinin sabit tutulacağı belirlenmelidir [59]. Faktörlerin sayısı, 'k', gözlem adetini 'n', tekrar adetini, 'r' harfleri kullanılarak sembolize edilir. Faktörler ve değişkenler büyük harflerle yazılır. 2k ve 3k faktöriyel şeklinde olanları da vardır [60]. Deney tasarımı uygulamalarında kullanılan genel kavramlar aşağıdaki gibidir [61].

Kalite Değişkeni: Kalite değişkeni süreçte iyileştirmek istenen değişkendir örneğin çelik yay üretim sürecinde gözlenen çatlak yay yüzdesi, seramik imalatında kusurlu olarak sayılan ürünlerin şekil bozukluğu, talaşlı imalatla üretilen parçanın yüzey pürüzlülüğü gibi değişkenler olabilir.

Faktör: Kalite değişkenine etki eden, kontrol edilebilir veya kontrol dışı değişkenler faktör olarak nitelendirilir. Faktör kantitatif ölçülebilir değişkenler olabilir. Örnek olarak sıcaklık ve süre gösterilebilir. Ölçülemeyen kalitatif değişkenler de olabilir. Örneğin farklı tezgahların ya da farklı operatörlerin etki değerleri gibi.

Seviye: Kalite değişkenine etki eden faktörlerin deneyde aldıkları farklı değerlere farklı değerlere faktör seviyeleri denir. Örnek olarak; sıcaklık faktörünün 50°C ve 80°C olması iki farklı seviye anlamına gelir.

2.4. Deney Tasarımındaki Temel Adımlar

Uygulamalarda izlenmesi gereken basamaklar aşağıdaki gibidir [61];

1. Kalite probleminin belirlenmesi: İncelemesi yapılacak ürünün kalite değişkenlerinin tanımlanması gerekir. Kalite değişkenlerinin nicel olması gerekir. Şayet ürün nitel özellikleri ile temsil ediliyorsa, birkaç kişinin oluşturduğu grup ile ürünün puanlaması yapılmalıdır.
2. Kalite değişkenlerini etkileyen potansiyel faktörlerin belirlenmesi: Ürünle ilgili sürecin akış şeması hazırlanması, belirlenen faktörlerin birbirleriyle olan ilişkilerini balık kılçığı diyagramında hazırlanması uygun olacaktır.
3. Faktörlerden hangilerinin deneyde kullanılacağını belirlenmesi: Faktörlerin değerleri değiştirilebilir yani kontrol edilebilir olmalıdır. Aynı zamanda deneyde yer almayan faktörler için deneye neden alınmadıklarının açıklanması gerekir.
4. İncelemesi yapılacak faktörlerin hangilerinin birbiri ile etkileşimleri olabilir, deneyde incelenmesinin ya da incelenmemesinin kararı verilmez.
5. Faktör ve incelenecek faktör sayısı baz alınarak L8 ve L16 gibi tasarım matrisi seçilmelidir.
6. Faktörlerin seviyelerin belirlenmesi: Alt ve üst düzeyler arası aralık çok küçük olduğu zaman, faktörün etkisi gözükmebilir. Aralık çok büyük oldu zamanda, faktör deneyde baskın hale gelir ve diğer faktörlerin etkilerini ölçmeyi engelleyebilir. Deneyde yer almayan faktörleri deney sırasında değerlerinin sabit olaması gerekir.
7. Tasarım matrisi kolonlarına faktörlerin atamasının yapılması.
8. Faktör seviye kombinezonları belirlenmelidir.
9. Deneyin uygulama sırasının tespiti için rassallaştırma yapılmalıdır.

10. Deney için uygulama planının yapılmalıdır ve uygulama grubuna faktör seviye kombinezonlarını verilmelidir.
11. Deneyin uygulanarak, kalite değişkeni 'Y' nin değerleri alınmalıdır.
12. Etki değerlerinin hesaplanması yapılmalıdır.
13. Normal olasılık grafiği çizilerek hangi etkilerin istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmelidir.
14. Önemli etkileşimler varsa, grafikler çizilerek yorumlanmalıdır.
15. Kalite değişkeni 'Y'nin olası değeri hesaplanmalıdır.

Sonuçların doğrulanması için belirli düzeylerde deneyler yapılmalıdır. Bunun nedeni süreç veya ürün için gerekli olan en optimum performansı yakalamak için deney parametrelerini belirlemektir, deneyde kullanılan faktörlerin kalite fonksiyonu üzerindeki etkisini tahmini yapılmasıdır. Deney tasarım yöntemleri arasında istatistiksel olmayan yöntem kullanıldığında, varyasyon ve regresyon analiz sonuçları etkin süreç işlemini belirleyemeyebilir. Örnek olarak, bir regresyon analizi sonucu bir işlemin sonucu etkileyebilecek sıcaklığın etkisini göstermeyebilir. Bu nedenden dolayı araştırmacıda sonucu iyileştirmek için sıcaklık uyarlaması yapmaz. Sıcaklığın normal dalgalanmasından dolayı sapmalar olabilir. Sıcaklıktaki bu dalgalanma istatistiksel hesaplanacak seviyede değildir. Bu tip hatalar ve kısıtlar üstesinden istatistiksel deney tasarımı yöntemi ile gelir [62].

Deneyisel tasarım teknikleri sayesinde deneyisel çalışmalarda, en az deney ile parametrelerin sonuç değişkeni üzerindeki etkileri belirlenmektedir. Bağımlı değişkeni etkileyen bağımsız değişkenler kullanılarak etkileşim gözlenmektedir. Aşağıda deney tasarım yöntemleri listelenmiştir;

- 1) Her Defada Tek Etken (HDTE),
- 2) Eşleştirilmiş Karşılaştırma
- 3) Tam Faktöriyel
- 4) Kısmi Faktöriyel
- 5) Latin Kareler
- 6) Graceo-Latin Kareler
- 7) Box-Behnken
- 8) Plackett-Burman
- 9) Taguchi

İstatistiksel deney tasarım yöntemleri sayesinde deney tasarımındaki klasik yöntemlerin eksiklikleri giderilmiştir. İstatistiksel deney tasarımında en çok kullanılan Taguchi Metodu hakkında bilgi verilecektir [63].

2.5. Her Defada Tek Etken (HDTE)

Her defasında bir faktörün ele alınıp, süreçteki performansa olan etkisi araştırılan deney tasarım yöntemidir. Seçilen faktörün performansa etki etmiyorsa başka faktör seçilir ve işlem tekrarlanır. Yapılan deneylerde süreci etki eden faktörler birden fazla ise, seçilmiş faktör dışındaki faktörlerin etkisinin olmadığı kabul edilir. Bu tarz deneylerde iki faktör arası etkileşimler gözlenemez. Faktörlerin etkisi bir bir incelenmesinden dolayı deney sayısında artma olur ve bundan dolayı deney maliyetleride artar.

Seçilen faktörün bir seviyesi her deney basamağında değiştirilir. Tek faktöriyel deney tasarımında, sadece seçilen faktörün sonuç üzerindeki etkisi araştırılır. 2 seviyede, 7 faktör için kurulan deneyin tek faktörlü deney tasarımı yapılmıştır. Minimum 8 deney yapmak gerekir [64].

2.6. Eşleştirilmiş karşılaştırma

Bu deneylerde iki farklı yaklaşım vardır.

1. Yaklaşımda: Her defasında incelenen faktör dışındaki faktörler sabit tutulur, yalnızca bir faktörün seviyelerinde değişim yapılır. Bu yaklaşımda da iki faktör arası etkileşimlerin incelenmesi yapılamaz.

2. Yaklaşımda: Faktörlerin seviyeleri aynı anda değiştirilir. Herbir faktörün performansına ayrı ayrı etkisi incelenemez. Bütün faktörlerin düşük ve yüksek düzeyleri karşılaştırılmasından dolayı faktörlerin birleştirilmiş etkisinden bahsedilmektedir [64].

2.7. Tam Faktöriyel Deney Tasarımı

Birden fazla faktörlerin etkilerinin deney parametreleri üzerindeki etkilerinin incelendiği ve faktöriyel seviye sayısı birden fazla olan deney tasarımı metodudur. Faktöriyel tasarımı yapılırken deneyde yer alan her faktörün bütün düzeylerinin diğer faktörler her bir seviyesini içeren olası bütün kombinasyonlarının oluşturulmasıyla

gerçekleştirilir.Örneğin 7 faktörü ve 2 seviyesi olan bir deneyde gerekli deney sayısı bütün faktör seviyelerinin çarpımıdır.Tablo 2.7.'de görüldüğü üzere $2^7 = 128$ tane deney yapılması gerekir.Tablo 2.1.'de yer alan hepsi 2 seviyeli A, B, C, D, E, F ve G gibi toplamda 7 faktör için etkisinin incelendiği bir faktöriyel deney tasarımı örneği yapılmıştır.Tablo içerisinde bulunan her bir kare bu 7 faktörü oluşturan her biri için bir seviyesini içeren deney kombinasyonudur.Örneğin Xi ile sembolize edilen deney kombinasyonunda 2. seviye A'nın, 1. seviye B'nin, 1. seviye C'nin, 1. seviye D'nin, 2. Seviye E'nin, 2. Seviye F'nin ve 1. Seviye G'nin kombinasyonlarının etkisini gösterir [65].

Her bir deney için tekrar sayısının fazla olması, deney tasarımı yaparken değişkenler arasındaki ilişkiyi daha iyi açıklayarak, güven aralığı daraltılır ve böylece aralık kestiriminin kesinliği artar [66].

Varyans analizi ile regresyon analizi tam faktöriyel deney tasarımı analizinde kullanılmaktadır. Bir parametrenin deney üzerindeki etkisi bu analizler ile bulunabilir. Bu analiz teknikleri farklılıkların kaynağının belirlenmesinde etkili olur [62].

Tam faktöriyel deney tasarımının fonksiyonların linerliğinin araştırılması yönünden ve faktörlerin birbirleriyle etkileşimlerinden bağımlı değişkene etkisi bulunarak sistem üzerine ekonomik açıdan değerlendirme yapılmasını sağlaması gibi özelliklerden ötürü avantajlı bir tasarım yöntemidir.Böylelikle süreç maliyetlerinin azaltılması, kalitenin geliştirilerek iyileştirilmesi sağlamaktadır.Tam faktöriyel tasarımda düşük seviye etkileşimler ile temel etkiler araştırılmak istendiğinde az sayıda deney için kesirli faktöriyel tasarımlarda kullanılabilir [67].

Tüm faktörlerin performans üzerindeki etkisinin ve faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimlerinin en kolay yönden ölçülebildiği deney tasarımı yöntemi olması nedeniyle faktöriyel deney tasarımı yönteminin en önemli avantajlarındanır. Dezavantaj olarak olası bütün kombinasyonları deneyerek zaman ve maliyet artışına sebep olmasıdır [65].

2.7.1. Tam faktöriyel deneylerinde görülen avantajlar ve kısıtlar

Avantajları;

-Bütün etkileşimler hakkında bilgi sunar.

-Her safasında bir faktör deneylerde etkisi vardır.

- Faktörlerle 2'den fazla deneyi yapılabilir.

-Nicel ve nitel girdiler için geçerlidir.

Kısıtları;

-2'den fazla faktör sayısı olduğu zaman deney sayıları uzun olabilir.

-2'den fazla seviye sayısı olduğu zamanlarda deney sayıları uzun sürebilir.

-Faktörlerin doğru seçilmezse zaman ve maddi zarara sebep olur.

-Nicel çıktılar için geçerlidir [68].

Faktörleri A, B ve C olan 3 faktörü ve 2 seviyesi olan tam faktöriyel tasarım oluşturmak için, bu faktörlerin düzeyleri + ve – olarak ifade edilir.

$$A = 1/4n \{a+ab+ac+abc-(1)-b-c-bc\} \quad (2.1)$$

$$B = 1/4n \{b+ab+bc+abc-(1)-a-c-ac\} \quad (2.2)$$

$$C = 1/4n \{c+ac+bc+abc-(1)-a-b-ab\} \quad (2.3)$$

$$AB = 1/4 \{abc-bc+ab-b-ac+c-a+(1)\} \quad (2.4)$$

$$AC = 1/4 \{(1)-a+b-ab-c+ac-bc+abc\} \quad (2.5)$$

$$BC = 1/4 \{(1)+a-b-ab-c-ac+bc+abc\} \quad (2.6)$$

$$ABC = 1/4 \{abc-bc-ac+c-ab+b+a-(1)\} \quad (2.7)$$

Faktöriyel tasarımı N^k şeklinde gösterilir, N düzey sayısını belirtir, faktör sayısı k ile ifade edilir. Düzey sayısı 2 ve faktör sayısı 4 olan bir deneyde $2^4 = 16$ deney yapılacaktır. Düzey sayısı 2'den fazla seçildiği zaman deney sayısında artış olur. Faktöriyel tasarım için bu durum olumsuzdur ve böyle bir durumda kısmi faktöriyel tasarıma başvurulur [70].

2.8. Kısmi Faktöriyel

Kısmi faktöriyel tasarım yöntemi zaman ve maliyet kaybını düşürmek için kullanılır. Ortogonal dizinler kullanılarak deneylerde faktör seviyeleri değiştirilerek daha az deney uygulaması ile faktörlerin hepsi denenmiş olur. Amaç kısmi faktöriyel ile deney sayısını azaltmaktır. Fakat bunu yaparken incelenen faktörler için değil faktörler arasındaki etkileşim sayısında azaltma yapmak daha uygundur. Serbestlik derecesi yüksek performans karakteristiği üzerindeki etkisinin az olarak tanımlanan

etkileşimlerin sayısında bir azaltma yapılması gerekir. Deney sayılarındaki bu azaltmanın başka bir yöntemde faktör seviyeleri olabildiğince 2 seviyede ‘yüksek değer’ seçmek ve ‘düşük değer’ seçmek gerekir. Bu sayede deneylerin tüm kombinasyonlarının etkisini incelemeye gerek kalmaz.

Kısmi faktöriyel tasarım, zaman ve bütçenin kısıtlı olduğu zamanlarda endüstride en çok kullanılan yöntemlerdendir. Avantajları ise;

-Girdi faktörlerinin sayısının ≥ 5 olduğunda

-Yüksek dereceli etkileşimlerin ihmalinde

- 2 dereceli etkileşimlerde

-Ön deney uygulamaları olduğunda

- Detaylı çalışma yapmadan önce girdilerin belirlendiği zaman

Örneğin her biri 2 seviyeli kısmi faktöriyel deney tasarımı kullanılarak deney sayısı 2^k iken 2^{k-p} kadar deney yapılır. Kısmi faktöriyel deney tasarımı aynı zamanda $1/2^p$ kısmi faktöriyel deney tasarımı olarak da bilinir. Taguchi yöntemi bir çeşit kısmi faktöriyel deney tasarımıdır. 2 seviyesi, 5 faktörü ve $1/2$ kesirli faktöriyel tasarım uygulanacaksa; $1/2$ kesrini $1/2^1$ diye gösterilir. 2'nin üssü olan 1 sayısı p değerini gösterir. Yani; $2^5 - 1 = 2^4 = 16$ deney yapılacaktır. 2 seviyeli, 5 faktörlü ve $1/4$ kesirli faktöriyel tasarım uygulamasında, $1/4$ kesrini $1/2^2$ olarak yazılabilir. Buna göre p değeri 2 olur. $2^{5-2} = 8$ deney sayısı olur. 2 seviye, 3 faktöre sahip kısmi faktörle deney tasarımı ile deney yapılırsa 3'lü etkileşimler ile daha fazla olan etkileşimler yok sayılabilir ve 4. faktör D olarak yazılır [71].

2.9. Latin Kareler

Deneyde yer alacak olan materyaller başka konularda farklılık arz ediyorsa, faktörlerin bu farklılıkların etkilerinden temizlenmesi için latin karesi deney tasarımı kullanılır. Hata olasılığı ve hata karesi ortalaması bu tasarımında azalacaktır. Bu sayede faktörlerin etkilerinin daha hassas değerlendirilecektir. Latin kareler deneyinde sıra ve sütun sayısı etkisi araştırılacak olan faktör sayısına ve birbirlerine eşittir. Deney sayısı faktör sayısının karesi kadardır. Tasarımın adındaki kare ifadesi de bundan dolayıdır. Faktör sayısı 5 ile 12 arasında ise genellikle Latin karesi deney tasarımı seçilir. Hata

serbestlik derecesi küçük olduğunda ve deney sayısının çok olduğu tasarımlar için tavsiye edilmez [66].

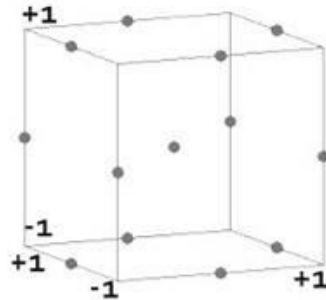
Faktörler satır ve sütunlara rassal olarak seçilerek, her bir sıra ve sütunda faktörler birer kez kullanılması gerekmektedir. Bundan dolayı bloklar içinde rassallaştırma yapılır. Örneğin; A, B, C ve D gibi dört farklı gübre gubunun (faktör) tarla üzerindeki verimliğe etkisinin inceleneceği deney tasarımında tarlanın sağdan sola gidilerek sulanması ve yukarıdan aşağı indikçe alacağı rüzgâr nedeniyle her bölümünün aynı olmayacağı düşünülmektedir.

2.10. Greko-Latin Karesi

Graeco-Latin tasarımında birincil derecede öneme sahip bir tane faktör vardır. Yunan harflerinden oluşan üç farklı bloklama değişkeni yer alır. Greko-Latin karesi tasarımına göre bloklama değişkenlerinin faktöre ait düzey sayısına eşit olduğu kısıtı vardır. Diğer kısıtı ise faktör düzeylerini belirten Latin harflerinin (A, B, C, ...) her satır ve her Yunan harfinde yalnız bir kere denenmesidir. Bu tür kısıtlarının olmasından ötürü nadiren kullanılır [72].

2.11. Box-Behnken

Box ve Behnken tarafından 1960 yılında geliştirilmiştir. 3^k faktöriyel tasarımların bir alternatifidir. Tasarım 2^k faktöriyel ve tamamlanmamış blok tasarımlarının kombinasyonu ile oluşturulmuştur. Box- Behnken tasarımları 3 düzeyde incelenir. 15 deney gerektirmesinden ötürü merkezi bileşik tasarımlara göre daha ekonomiktir. Deneyde bir kısıt olması ya da maliyetin yüksek olması durumunda faktör düzeyinde kombinasyonları küpün köşe noktaları gösterir. X değerleri faktörleri gösterirken, seviyeler ise -1, 0, 1 değerleridir. Şekil 2.3.' de Box- Behnken modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Box-Behnken tasarım modeli [69].

2.12. Taguchi Metodu

W. E. Deming tarafından kalite tekniklerinin çoğu tasarlanmıştır. Profesör Genichi, Taguchi felsefesini bu kalite tekniklerinin üzerine inşa etmiştir. Deming'in en önemli başarısı kaliteyi geliştirmek için işletmelerin üretim süreçlerini, istatistiksel olarak kontrol etmeleri gerektiğine ikna etmesidir. Taguchi ise Deming 'den biraz daha geriye giderek kalitenin üretim aşamasından önce tasarım safhasında gerçekleştirileceğini açıklamıştır [73].

Taguchi'ye göre kalite ürünün müşterisine ulaştıktan sonraki safhada toplumda oluşan kayıpla ölçülür. Müşteri memnuniyetsizliğini bu kayıpları kapsar ve işletmelerin itibar kayıplarına neden olur. Taguchi'nin kalite üzerine bu tanımı müşteri üretim sürecinde en değerli etkidir. Ürünün kalitesi müşteri memnuniyetine neden olur bu da piyasa genelinde itibarın artmasını sağlar. Geleneksel tanımda kalite daha farklı tanımlanır. Geleneksel tanıma göre kalite üretici merkezlidir ve kalite maliyeti olarak hurda, servis hizmeti, garanti koşullarını ve yeniden işleme maliyetlerini kapsar [74].

Kaliteyi iyileştirmek değişkenliğin azaltılması ile gerçekleşir. Kaliteyi elde etmek için sıfır sapma ve sıfır bozulma yapılmalıdır. Taguchi ye göre bir ürünün rededilmesinin önemli sebebi ürün spesifikasyonlarındaki değişkenliktir. Yani ürünün tasarım aşamasında belirlenmiş hedef ölçülerinde üretilmesi gerektirir. Taguchi değişkenliğe neden olan faktörleri ikiye gruba ayırır. Kontrol edilebilir değişkenler ve ve kontrol edilemez değişkenler diye. Ürün üzerinde etkilerinin ayarlanabildiği değişkenler kontrol edilebilir değişkenlerdir. Örnek olarak malzeme, üretim yöntemi, makine vb. verilebilir. Etkilerinin ayarlanması zor ya maliyeti yüksek ya da ayarlanması yapılamayan değişkenler kontrol edilemeyen değişkenlerdir. Örnek olarak nem, ısı, makinelerin eskimesi verilebilir. Taguchi'nin amacı kontrol edilebilir değişkenlerin değerlerini en iyi olacak şekilde seçmek, kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisinin minimum seviyede olduğu üretim sürecini yakalamaktır [75].

Korozyon nedeniyle ülkelerin kayıpları gayrisafi milli gelirinin % 3,5-5 arasında yer almaktadır. Kayıpların bu denli yüksek oluşu ve endüstride meydana gelen gelişmeler, dayanıklı ve kararlı malzemelere olan gereksinimi arttırmıştır. Bu nedenle düşük maliyetle ve gerekli tüm yapısal özellikleri sağlayan, yüzey özellikleri gelişmiş malzemelerin üretilmesi önem kazanmıştır. Yüzey işlemlerinde yapılan uygulamaların amacı parçanın tribolojik ve mekanik özelliklerini geliştirerek üretim maliyetini

düşürmektedir. En önemli amaçların başında parçanın korozyona karşı direncinin artırılması gelir.

Son zamanlarda intermetalik kaplamalar üzerindeki çalışmalar gündemdedir. Borür, oksit, nitrür ve karbür kaplamalar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır [76].



3. ÇALIŞMADA KULLANILACAK DENEYSEL VERİLER VE PROBLEMİN TANIMLANMASI

3.1. Giriş

Tasarımın gerçekleştirilmesinde 2008 yılında Eren YILMAZ tarafından yapılan, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans, ‘Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle Çeliklerin Demir Alüminid Kaplanması’ adlı tez çalışmasında [76] yer alan kaplanmış AISI 4140, AISI M2 ve AISI D2 çeliklerine ait, sertlik, kırılma tokluğu ve kaplama kalınlığı deney sonuçları kullanılmıştır.

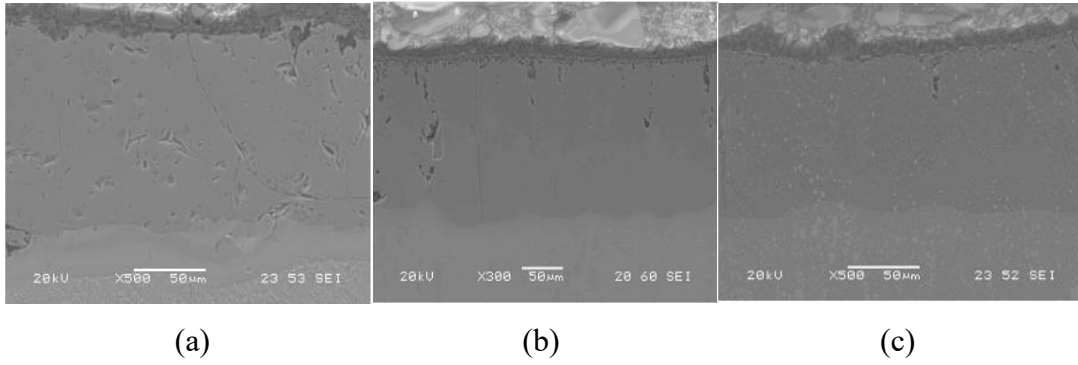
3.2. Mikroyapı, Tabaka Kalınlığı, Sertlik ve Kırılma Tokluğu İncelemeleri

AISI 4140 çeliği çoğunlukla mukavemet gerektiren makine sanayinde başta olmak üzere millerde, pimlerde, akslarda, hareketli makine parçalarında, dişlilerde kullanılmaktadır. AISI M2 çeliği matkap, rayba, klavuz, kesici freze uçlarında, paftalar ve talaşsız şekillendirme proseslerinde kullanılmaktadır. AISI D2 çeliği vida-civata ovma tarakları, kesme ve bükme kalıplarında, civata ve perçin başlarının şişirilme proseslerinde kullanılmaktadır.

Metalografik olarak yüzeyleri hazırlanan ve kaplama işlemi gerçekleştirilen AISI 4140, AISI M2 ve AISI D2 çeliklerine ait mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Şekil 3.1’de 800°C ’de 3 saat süreyle demir alüminid kaplanan çeliklerin SEM görüntüleri görülmektedir.

Aynı şekilde çeliklerin demir alüminid kaplama tabaka kalınlıklarının yapılan incelemeler ve ölçümler sonucunda sıcaklık ve süreye bağlı olarak değişimleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Sıcaklık ve süre artışına göre tabaka kalınlıkları artmaktadır.

Demir alüminid kaplanmış çeliklerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Çelik bileşiminde bulunan karbon oranının artışına bağlı olarak sertlik değerleri artmaktadır [76].



Şekil 3.1. 800°C 'de 3 saat süreyle kaplanan a) AISI 4140 b) AISI D2 c) AISI M2 çeliklerinin SEM görüntüleri [76]

Tablo 3.1. Kaplanmış üç çeliğe ait kaplama kalınlığı değişimleri [76]

Kaplama kalınlığı (μm)									
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	37,56	62,92	83,48	74,47	142,89	201,25	138,16	214,74	280,38
AISI D2	35,45	59,45	72,77	52,59	142,74	202,62	166,16	284,51	346,33
AISI M2	33,00	55,59	74,33	71,84	151,28	204,75	155,33	270	336,29

Tablo 3.2. 15 μm yüzeyden itibaren demir alüminid ile kaplanan üç çelik için sertlik dağılımları [76]

Yüzeyden itibaren mesafe (15 μm)	Sertlik (HV)								
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Zaman(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	908,3	950,0	908,3	960,0	908,3	907,6	952,1	1003,2	950,0
AISI D2	952,4	952,4	955,5	1058,0	1117,8	1058,2	1113,9	1003,2	1058,2
AISI M2	1003,2	1058,2	1058,2	1113,9	1178,4	1178,4	1113,9	1113,9	1113,9

Çeliklere ait kırılma tokluğundaki değişimleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Kırılma tokluğunun zamanla ve sıcaklıkla doğru orantılı arttığı tespit edilmiştir. Kaplanmış üç çeliğe ait kaplama tabakası kırılma tokluk değişimleri Tablo 3.3.'de gösterilmiştir [76].

Tablo 3.3. Kaplanmış çeliklere ait kırılma tokluk değişimleri [76]

Kırılma Tokluğu (MPa. $m^{1/2}$)									
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Zaman(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	0,92±0,03	1,2±0,44	1,54±0,15	1,31±0,24	1,6±0,25	1,98±0,17	1,61±0,18	1,9±0,49	2,15±0,46
AISI D2	0,70±0,09	1,5±0,75	2,15±0,73	1,2±0,34	2,01±0,17	2,77±0,65	1,67±0,37	2,12±0,42	2,87±0,82
AISI M2	1,26±0,08	1,5±0,51	1,9±0,72	1,65±0,11	2,06±0,63	2,58±0,30	1,90±0,21	3,3±0,57	3,95±0,59

3.2. Problemin Tanımlanması

Bu çalışmada 22 mm çapında, 5 mm kalınlığında AISI 4140, AISI M2, AISI D2 çelik çubuklar kesilerek, metalografik koşulları sağlandıktan sonra sıcaklıklar 700 °C, 800 °C ve 900 °C’de, süre olarak 1 saat, 3 saat ve 5 saat saf alüminyum ve naftalinin toz karışımında alümina, amonyum klorür termokimyasal işlemleri ile demir alüminid kaplamaları prosesi gerçekleştirilmiştir. Termokimyasal işleme tutularak kaplanan numune yüzeyi, kaplama sıcaklık süresi, sertliği, kaplama kalınlığı, aktivasyon enerjisi, kırılma tokluğu gibi kontrol faktörlerinin analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarındaki parametreler çok yanıtli optimizasyon yaklaşımı olan Taguchi yöntemi kullanılarak, Taguchi’nin L9 tasarımına göre deneyler yapılmıştır ve çoklu kalite karakteristik optimizasyonunu sağlamak için parametreler optimize edilmiştir. Kontrol parametrelerinden kaplama kalınlığı ve kırılma tokluğu deneylerinde sıcaklık parametresinden etkili parametredir. Proses parametrelerinin optimum değerleri ise; en dış yüzeyinden 15 mikrometre uzaklıkta, 5 gram yük altında sertliği 350-480HV, kaplama kalınlığı 35-346 µm aktivasyon enerjisi 148,84 kJ/mol kırılma tokluğu 0,7-2,87 MPa. $m^{1/2}$ olarak ölçülmüştür.

3.3. Hedefin Belirlenmesi

Bu çalışmada difüzyon kalınlığının ve sertliğin maksimum seviyelerde olması istenmektedir. Bu hedeflere ulaşmak amacıyla Taguchi deney tasarımı ve çok yanıtli deney tasarımı yöntemleri kullanılmış, deney üzerinde etkili olan faktörler belirlenerek istenilen sonuçlara daha kısa sürede, daha az deney yaparak ulaşmak ve maliyetleri minimize etmektir.

3.4. Faktör ve Seviyelerin Belirlenmesi

Çalışmada analiz sırasında kullanılacak seviyeler ve faktörler Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Seviye ve faktörler

FAKTÖRLER	SEVİYELER		
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A-Sıcaklık(°C)	700	800	900
B-Süre(saat)	1	3	5
C-Karbon % oranı	AISI 4140 (0,40)	AISI D2 (1,33)	AISI M2 (0,95)

3.5. Problemin Çözümü İçin Önerilen Yöntem (Taguchi Yöntemi)

Yüksek kalite seviyesinde, düşük maliyetli ürünler üretmek günümüz ekonomik şartlarında var olmanın temel unsurudur. Kalite kavramının çoğu yaklaşımında bunu gerçekleştirmenin en ideal yolu ürün tasarımına odaklanmaktır. Yani kaliteyi kontrol aşamasında değilde ürünün tasarımında ar-ge sürecinde sağlamak daha kolay olacağını savunur [4]. Kaliteyi tasarlama sürecinde sağlamak, üretimden sonraki ürünü muayene ayıklanmasından ve uygun olmayan ürünleri yeniden iyileştirilmesinden yada hurdaya ayırarak maliyete neden olmasından daha iyi ve ucuzdur. Bu nedenle yeni kalite felsefesinde düşük maliyetli, yüksek kalitede ürünler üretmek için tasarım sürecinde istatistiksel yöntemleri kullanmak daha etkili olacaktır.

Taguchi kaliteyi şöyle tanımlar “Kalite ürünün müşteriye ulaşmasından sonraki süreçte toplumda meydana gelen kayıptır” şeklindedir.

Bir ürününün kalitesini, ürünün farklı performanslarının geliştirilmesi ve üründen beklenen özelliklerin tasarım aşamasında ortaya konulmasıdır.

Kaliteyi geliştirmek için Dr. Genichi Taguchi temelini deney tasarımına dayanan, Taguchi yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, sağlam tasarım ve ortogonal dizinler kavramlarının kısmi faktöriyel deney tasarımı yöntemine dahil edilerek oluşturulmuştur.

Taguchi'ye göre kalitenin uygulanabileceği en önemli aşama, üretim öncesinde yapılan tasarım çalışmalarıdır.

3.6. Taguchi Deney Tasarımı Yönteminin Adımları

Taguchi Deney Tasarımı ile gerçekleştirilecek çalışmada yer alacak eylemler, tasarım adımları ve çözüm yöntemleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Taguchi Deney Tasarımı Adımları

Çözüm Basamakları	Yapılan Eylem	Çözüm Yöntemi
1	İyileştirme yapılacak olan problemin belirlenmesi	-
2	Faktörlerin seçimi ve seviyelerinin belirlenmesi	-
3	Faktörlerin ve etkileşimlerin sütunlara atanarak uygun ortogonal dizi seçimi	MİNİTAB
4	Deneylerin yapılarak ve sonuçlarının kaydedilmesi	Laboratuvar Ortamı
5	Veri analizi ile kontrol edilebilen değişkenlerin en ideal değerlerinin belirlenmesi	MİNİTAB
6	Deneyin Sonuçlandırılması	Hipotez Testleri

3.6.1. Taguchi yönteminin gelişim süreci

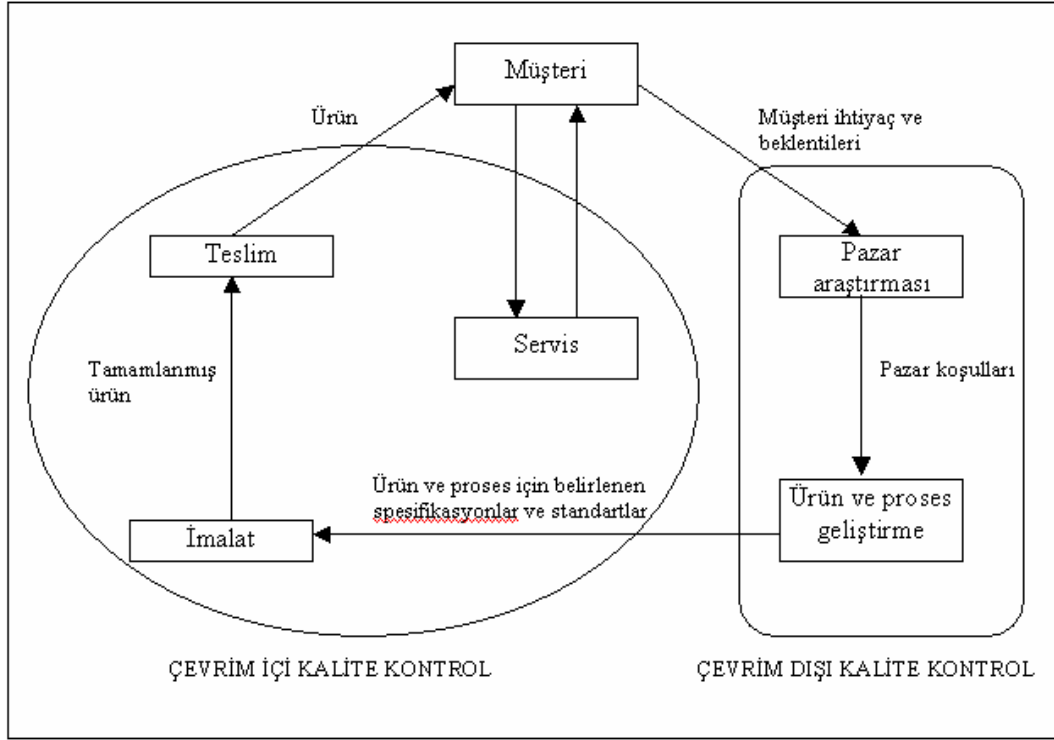
1940’lardan günümüze, kalite alanında çok sayıda çalışması olan Dr.Taguchi tarafından, Japon telefon sisteminin geliştirilmesiyle ulaştığı başarısıyla adını duyurmuştur.

3.6.2. Taguchi yönteminde kalite kontrol

Taguchi kaliteyi elde etmek için kaliteyi çevrim dışı ve çevrim içi kalite kontrol diye iki bölüme ayırmıştır. Çevrim içi kalite kontrolü üretimi yapılan ürünün, muayene yöntemleri ile kalitesinin sağlanması çalışmalar olarak tanımlar.

Çevrim dışı kalite kontrolü ise ürünün pazar araştırması yapılarak, üretim proseslerinin geliştirilmesi, mevcutta var olan kalite probleminin çözümü için problemin tespit edilerek ortadan kaldırmak için gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içermektedir (Şekil 3.2) [9].

Taguchi ürün tasarımı ve proses tasarımı aşamalarında kalite geliştirmek için üç aşamalı bir yaklaşım geliştirilmiştir.



Şekil 3.2. Taguchi'nin kalite faaliyetleri

Taguchi ürün tasarımı ve proses tasarımı aşamalarında kalite geliştirmek için üç aşamalı bir yaklaşım geliştirmiştir.

3.6.3. Sistem tasarımı

- Pazarın tanımlaması
- Teknoloji değerlendirmesi
- Gerekli olan bilgi
- Muhasebe
- Pazarlama
- Mühendislik
- Tercihlerin yapılması
- Malzeme cinsi seçimi
- Yarı mamul cinsi seçimi
- Ölçme metotlarının seçimi
- Üretim alet ve cihazlarının seçimi

3.6.4. Parametrelerin tasarlanması

- Deney tasarımı yönteminin uygulanması
- Faktörler arasında en iyisinin seçimi

- Düşük maliyetle kaliteyi artırma

3.6.5. Tolerans tasarımı

- Toleransların daraltılması
- Toleransların düşürülmesi ve toplumsal kaybın azaltılması.





4. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN UYGULANMASI VE İSTATİKSEL ANALİZ

4.1. Orthogonal Dizinin Belirlenmesi

Ortogonal dizinler seçilirken kontrol edilebilen faktörlerin serbestlik dereceleri toplanarak seçilir. Faktör seviye sayısından bir çıkararak faktörlerin serbestlik derecesi hesaplanır. Tablo 4.1.'de gösterildiği gibi serbestlik derecesi bulunacaktır.

Kaplama kalınlığı ve kırılma tokluğu bulunurken kullanılan faktörler ve serbestlik derecesi aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 4.1. Kaplama kalınlığı ve kırılma tokluğu deneyleri için faktörlerin ve toplam serbestlik derecesinin hesaplanması

Faktörler	Serbestlik derecesi
Sıcaklık	$3-1=2$
Zaman	$3-1=2$
Serbestlik derecesi toplamı	$2+2=4$

Kaplama kalınlığı ve kırılma tokluğu deney sonuçlarına göre yapılan Taguchi analizlerinde, aşağıdaki tabloya göre sıcaklık ve süre iki tane parametreye göre yapıldığından faktör sayısı 2, sütun sayısı 3 olduğu için Level 3 olarak alınmıştır. Dokuz farklı deney yapılmıştır. Faktör ve level seviyesine uygun dizin ise; $L9(3^2)$ olarak seçilmiştir.

Sertlik deney sonuçlarına göre yapılan Taguchi analizlerinde sıcaklık, süre ve içerdikleri karbon yüzdelerine göre üç parametreye göre yapıldığından dolayı faktör sayısı 3, sütun sayısı 3 olduğu için Level 3 olarak alınmıştır. Dokuz farklı deney yapılmıştır. Faktör ve level seviyesine uygun dizin ise; $L9(3^3)$ olarak seçilmiştir.

Tablo 4.2'de kaplanmış üç çeliğe ait çeliklerinin kaplama kalınlığı değişimleri yer almaktadır.

Tablo 4.2. Kaplanmış üç çeliğe ait olarak kaplama kalınlığı değişimleri

Kaplama kalınlığı (µm)									
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	37,56	62,92	83,48	74,47	142,89	201,25	138,16	214,74	280,38
AISI D2	35,45	59,45	72,77	52,59	142,74	202,62	166,16	284,51	346,33
AISI M2	33,00	55,59	74,33	71,84	151,28	204,75	155,33	270	336,29

Tablo 4.3’de, kaplanmış çeliklerin kırılma tokluğu değişimleri yer almaktadır.

Tablo 4.3. Kaplanmış üç çeliğe ait kırılma tokluğu değişimleri

Kırılma Tokluğu									
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	0,92	1,2	1,54	1,31	1,6	1,98	1,9	1,9	2,15
AISI D2	0,70	1,5	2,15	1,2	2,01	2,77	2,12	2,12	2,87
AISI M2	1,26	1,5	1,9	1,65	2,06	2,58	3,3	3,3	3,95

Aşağıda Tablo 4.4.’de yer alan faktörlerin toplam serbestlik dereceleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. Sertlik deney sonuçları analizi için faktörlerin ve toplam serbestlik derecesinin hesaplanması

Faktörler	Serbestlik derecesi
Sıcaklık	3-1=2
Süre	3-1=2
Çelik malzeme	3-1=2
Serbestlik derecelerin toplamı	2+2+2=6

Sertlik deney sonuçlarına göre yapılan Taguchi analizlerinde aşağıdaki Tablo 4.5.’e göre sıcaklık, süre ve karbon yüzdeleri 3 tane parametreye göre yapıldığından faktör sayısı 3, sütun sayısı 3 olduğu için Level 3 olarak alınmıştır.Faktör ve level seviyesine uygun dizin ise; L9(3^3) olarak seçilmiştir.

Tablo 4.5. 15 µm yüzeyden itibaren demir alüminid ile kaplanan üç çelik için sertlik dağılımları

Yüzeyden itibaren mesafe (15 µm)		Sertlik (HV)								
Sıcaklık (°C)	700	800			900					
Zaman(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5	
AISI 4140	908,3	950,0	908,3	960,0	908,3	907,6	952,1	1003,2	950,0	
AISI D2	952,4	952,4	955,5	1058,0	1117,8	1058,2	1113,9	1003,2	1058,2	
AISI M2	1003,2	1058,2	1058,2	1113,9	1178,4	1178,4	1113,9	1113,9	1113,9	

4.2. Taguchi Yönteminin Uygulanması

Bu tez çalışmasında deney çıktıları olarak elimizde kaplama kalınlığı, kırılma tokluğu ve sertlik değerleri bulunmaktadır. Bu üç veri birbirinden farklı üç çıktı olduklarından ötürü Taguchi deney tasarımı yönteminde bir arada değerlendirilmeleri doğru bir yöntem sayılmayacaktır. Bundan dolayı Taguchi yönteminde bu üç deney sonucu ayrı ayrı incelenmiştir.

4.3. Kaplama Kalınlığı İçin Sinyal/Gürültü Oranı Hesaplanması

Tablo 4.6. Seviye ve faktörler

SEVİYELER			
FAKTÖRLER	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A-Sıcaklık(°C)	700	800	900
B-Süre(saat)	1	3	5
C-Karbon % oranı	AISI 4140 (0,40)	AISI D2 (1,33)	AISI M2 (0,95)

Tablo 4.6.'da yer alan üç çelik türü için, kaplama kalınlığı deney sonuçları baz alınarak yapılan Taguchi deney tasarımında, kaplama kalınlığına etki eden faktörlerin önem sırası “sıcaklık-süre” şeklinde olduğu görülmektedir. Bunun anlamı kaplama kalınlığını istediğimiz herhangi bir değere çekmek için, sıcaklık faktörü üzerinde değişimler yapmamız gerekir.

4.4. İstatiksel Analiz

4.4.1. Anova analizi

Bu çalışmada yapılan deneylerin amacı prosesi kontrol etmek ve prosesin performansını etkileyen parametrelerin neler olduğunu belirlemek, önem dereceleri hakkında bilgi sahibi olmaktır.

Kurulan modelin kalitesini ölçmek için içerisinde istatiksel metotlar barındıran varyans analizi (ANOVA) kullanılmaktadır. ANOVA testi kontrol edilen parametrelerin ortalama performansları arasındaki farklılığı istatistiğe dayalı bir yöntemle açıklayan bir araçtır.

ANOVA testi ile hesaplanabilen bir diğer belirleyici istatistikte varyanstır.

Hata varyansı kontrol edilemeyen faktörlerin neden olduğu değişimin ölçüsüdür. Deneylerde yer alan ölçüm hatalarını içerir. Etkileşimlerin varyansı ve faktörlerde benzer şekilde hesaplanır.

Hata kareler toplamı ise ortogonal düzende ataması yapılmayan sütunların toplam kareler toplamıdır. Sütunların hata varyansının hesaplanmasında kullanılması sütunlara faktörler atandığından ötürü kullanılır. Performans karakteristiğini önemli derecede etkilemeyen faktörlerin atandığı sütunların varyansı küçük olacaktır, bunlar ise hata varyansının belirlemede kullanılırlar.

Deney sonucunda bir faktörün katkısı yüzde olarak küçükse, analiz hesaplamalarında göz ardı edilerek tasarım için büyük önem taşıyan faktörlerin belirlenmesinde yardımcı olur. Kareler toplamı ise hata varyansını hesaplarken hangi sütunların birleştirileceğini belirler. Hata varyansı için 'F' testi de uygulanabilir.

Özetle, Anava analizi modelin kalitesini ölçer. R kare değeri modelin anlamlılığı sonucunu verir.

P değeri ise anlamlılık değeri anlamına gelir ve 0,005 in altında ise kurulan model başarılıdır.

Her bir faktörün F ve P değerleri bulunmuştur. Yüzde %95 güven seviyesinde hesaplanan P değerlerinin 0,005'in altında çıkması her bir faktörün deney üzerinde etkisinin olduğunu bize göstermektedir.

4.4.2. F testi

İki veri dizisine ait standart sapmaların karşılaştırılması için kullanılan F-testi “Kesinliklerin anlamlılık testleri” diye bilinir. Farklı iki kişinin metotlar aynı iken analiz ve ölçümlerin kıyaslanması (kişilerin karşılaştırılması), aynı kişinin farklı zamanda yaptığı ölçüm ve analizlerin kıyaslanması (zamanın kıyaslanması), iki farklı yöntem veya makine ile elde edilen ölçümlerin kıyaslanması (metotların karşılaştırılması) standart sapmalarının kıyaslanması için kullanılır. F-testi tek yönlü ve iki yönlü şeklinde kullanılır. F-testi hesabı karşılaştırılacak iki veriye ait standart sapmaların kareleri (varyansları, s^2), büyük değer/küçük değer olacak şekilde bölünür ve F hesap sonucu güven seviyesindeki tablolardaki ‘F’ kritik değeri ile karşılaştırılması yapılır.

$$F_{hesap} = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

($s_1 > s_2$ ve $F_{hesap} > 1$ olmalıdır)

$F_{hesap} < F_{kritik}$ ise; standart sapmalar arasındaki bu farkın önemli olmadığına karar verilir.

Çift yönlü F testleri için % 95 güven seviyesi $\alpha=0,05$ değil, $\alpha/2 = 0,025$ olarak alınması gerekir.

F değeri büyük olan faktörlerin performans bakımından etkili olduğu düşünülür [77].

4.4.3. P testi

Sıfır hipotezi olarak da bilinen P değeri gözlemlenenen eşit veya daha uzak sonuç bulma olasılığıdır. P değeri olasılığı simgeler ve gruplar arasındaki farkın şans eseri olma olasılığını ifade eder. Ne kadar sıfıra yakın değer alırsa, gözlenen farkın şansa bağlı olma olasılığı düşer.

Bire yakın P değeri ise gruplar arasında şans dışında fark yoktur manasına gelir. P değeri belirlendikten sonra değerın sıfıra yakınlık durumuna bakılarak "çok önemli" diye ifade edilir.

Yüzde %95 güven aralığında hesaplanan P değerleri 0,005 ‘den küçük çıkması her bir faktörün deney üzerinde etkisinin olduğunu gösterir.

P-değeri; istatistiksel bir test yapıldığında sıfır hipotezinin(H_0)'ın reddedilmesi yada reddedilmeyeceğine karar verilmesini sağlar. P-değeri küçüldükçe sıfır hipotezini reddetme olasılığı yükselir.

P-değeri, sıfır hipotezi içersinde gerçekleşmiş olma olasılığıdır.

Testin sıfır hipotezi doğruysa P-değeri, testin istatistiğini hangi sıklıklarla istatistiksel test tarafından hesaplanandan daha fazla görmeyi umduğunu söyler.

Örnek olarak; ortalama olarak aynı notları alan iki farklı öğrenci grubu için, t-testindeki test istatistiği sıfır hipotezinden ile yakından eşleşir ve çıkan p değeri 1'e yakındır. Gerçek dünyada gruplar birebir eşit olamayacağı için p-değeride 1 olmayacaktır.

İki öğrenci grubu arasında ortalama not farkı varsa test istatistiği sıfır hipotezince tahmin edilen değerlerden uzaklaşır ve p-değeri küçük çıkacaktır. P-değeri hiçbir zaman sıfır çıkmaz.

4.4.4. Sıfır hipotezi

İstatistiksel testlerin hepsinde sıfır hipotezi yer alır. Sıfır hipotezi araştırılan değişkenler arasında ilişki olmadığı ya da gruplar arasında farkın olmadığı durumdur.

Örneğin bağımsız örneklem t-testi hipotezleri ya gruplar arasında fark yoktur yada anlamlı fark vardır. Bunlara H_0 ve H_1 hipotezi denir.

4.4.5. P-değeri – alfa seviyesi

Alfa seviyeleri araştırmacının kontrolü ile ve güven seviyelerini gösterir. Alfa düzeyi elde etmek için %100'den çıkararak belirlenir. Araştırmacı yüzde 98 güven düzeyi belirlediğinde alfa düzeyi %2 çıkacaktır. Test bir p-değeri belirler ve bu değer seçilen alfa düzeyiyle kıyaslanır. Örneğin alfa düzeyi %5 (0,05) olarak seçilsin. Test sonucu $p \leq 0.05$ ise bu sıfır hipotezinin geçersiz olduğunu ispatlar. Test sonucu $p > 0.05$ ise hipotezin zayıf olduğu anlaşılır ve sıfır hipotez reddedilemez.

4.4.6. P-değerinin hesabı

P-değerleri hesaplanırken p-değeri tabloları veya istatistik yazılım kullanılır. Bu hesaplamalar, test edilen istatistiğin varsayılan veya bilinen olasılık dağılımına dayanmaktadır. P-değeri olasılık dağılımı göz önüne alınarak gözlemlenen değer ile seçilen bir referans değer arasındaki sapmadan hesaplanır.

P-değerinin matematiksel hesabı, olasılık dağılım eğrisinin altındaki toplam alandan, referans olan değerden en az gözlenen değere kadar tüm istatistik değerlerini kapsayan olasılık dağılım eğrisinin altındaki alandan, integral alınarak hesaplanır.

Yani gözlemlenen değerler arasındaki fark büyük çıkarsa, farkın şanstıan olma olasılığı o kadar düşüktür ve buda düşük p-değeri ile ifade edilir.

4.4.7. P-değerinin anlamlılığı

P-değeri, olayların şansı sonucu meydana gelme olasılığını açıklayan sayıdır. P-değeri 0 ve 1 arasındadır. Sıfır hipotezini reddetmek demek, P-değeri ne kadar küçük olursa gerçekleşir.

Eşik değeri ifade etmek için kritik değeri veya alfa değeri tanımlamaları kullanılır. Bu eşik değeri çalışma alanına bağılı olarak değişebilir. Bazı alanlarda 0,01, 0,001 eşikleri kullanılır. En yaygın kullanılan eşik değeri eşik $p < 0,05$ 'tir.

Kritik değeri 0,05 olarak kullanılan çalışma için 0,05'ten küçük olduğunda anlamlıdır. 0,05'ten yüksek bir p-değeri ise anlamlı değildir ve bu durum sıfır hipotezini savunduğumuz ve alternatif hipotezi reddetmek demektir.

4.4.8. P-değeri ne anlama gelir?

0,01'lik bir p-değeri demek testi yapılan sıfır hipotezinin gerçekten doğru olduğu zaman sonuçların gözlemlenmesinin %1 şansı demektir. Buda sıfır hipotezini reddetmek demektir, oldukça az rastlanan bir veri sonucu gözlemlenmiştir ya da sıfır hipotezi yanlıştır anlamına gelir.

4.4.9. İki Farklı p-değeri olan test sonucunu karşılaştırmak

P-değeri 0,01 ve P-değeri 0,03 olan iki farklı sonuç arasında p-değeri 0,01 olan sonuç, 0,03 olan p-değerinden daha anlamlıdır. Her iki p- değeri de istatistiksel olarak anlamlı kabul edilir fakat 0.01 olan p-değeri 0.03 olan p- değeri den daha güçlüdür.

4.4.10. P-değerlerinin Kullanımı

Küçük örneklem alanları kullanıldığında ya da tek bir çalışma için sıfır hipotezini reddedilmesi, p-değerinden daha yüksektir. Çünkü referans çevresi ne kadar küçükse kazara anlamlı bir örüntüye rastlama şansı da o derecede yüksektir.

P-değeri demek alternatif hipotezi destekleyen veya çürüten değeri olarak da ifade edilebilir. Ancak durum böyle görüldüğü gibi değildir. P-değeri sadece sıfır

hipotezinin desteklenip desteklenmediğini söyler. Alternatif hipotezin doğru olup olmadığını veya sebebini söyleyemez [78].

4.5. Kaplanmış AISI 4140 Çeliği Kaplama Kalınlığı Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli

Tablo 4.7. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı değişimleri

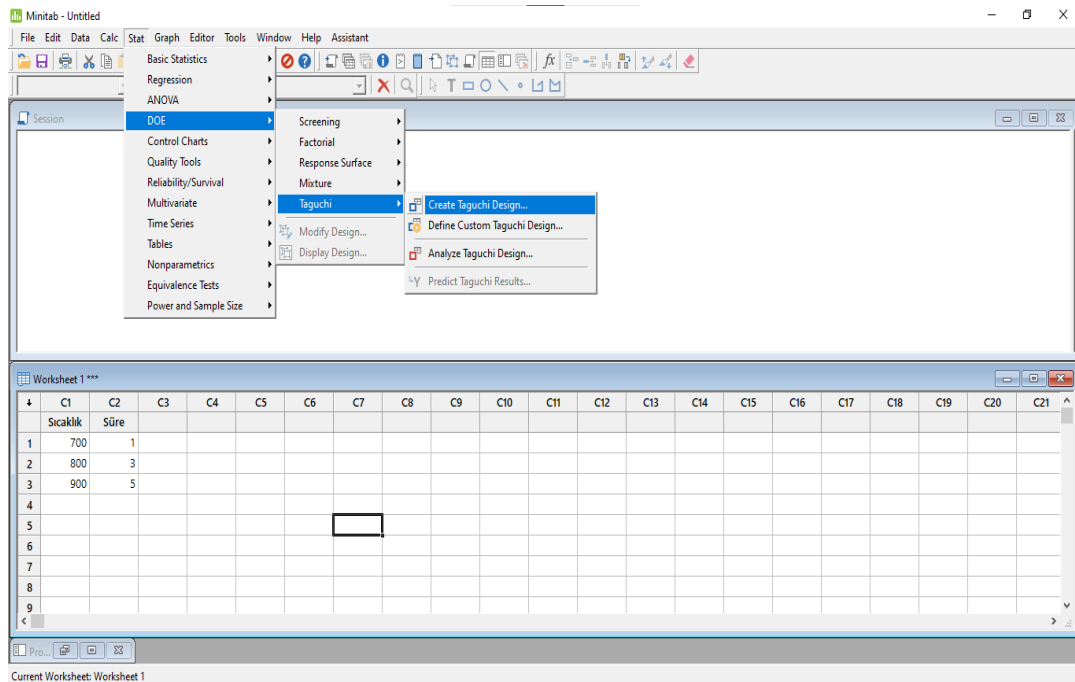
Kaplama kalınlığı (μm)									
Sıcaklık(°C)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	37,56	62,92	83,48	74,47	142,89	201,25	138,16	214,74	280,38

Taguchi Deney analizinin yapılabilmesi için Tablo 4.7.'deki planlanan L9 ortogonal dizini kombinasyonları için testi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.1.'de görülmektedir.

Minitab Programında Analiz İçin İşlem Adımları

1. Adım

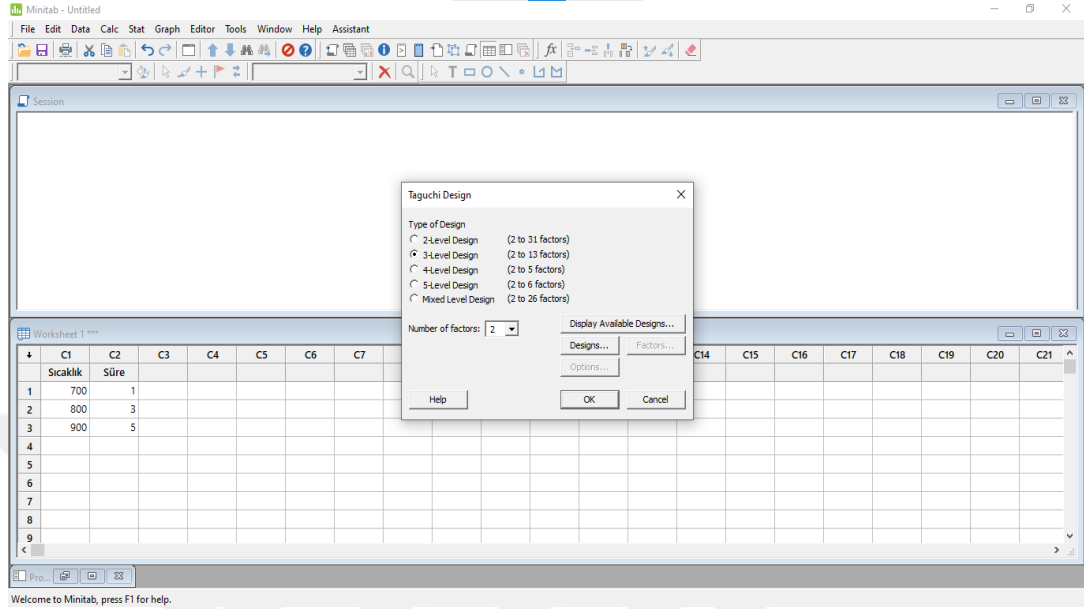
Şekil 4.1.'den Minitab programında taguchi deney tasarımının ara yüzüne ulaşılır. DOE - TAGUCHI-CREATE TAGUCHI – DESIGN tıklanır.



Şekil 4.41. Parametrelerin giriş ekran arayüzü

2.Adım

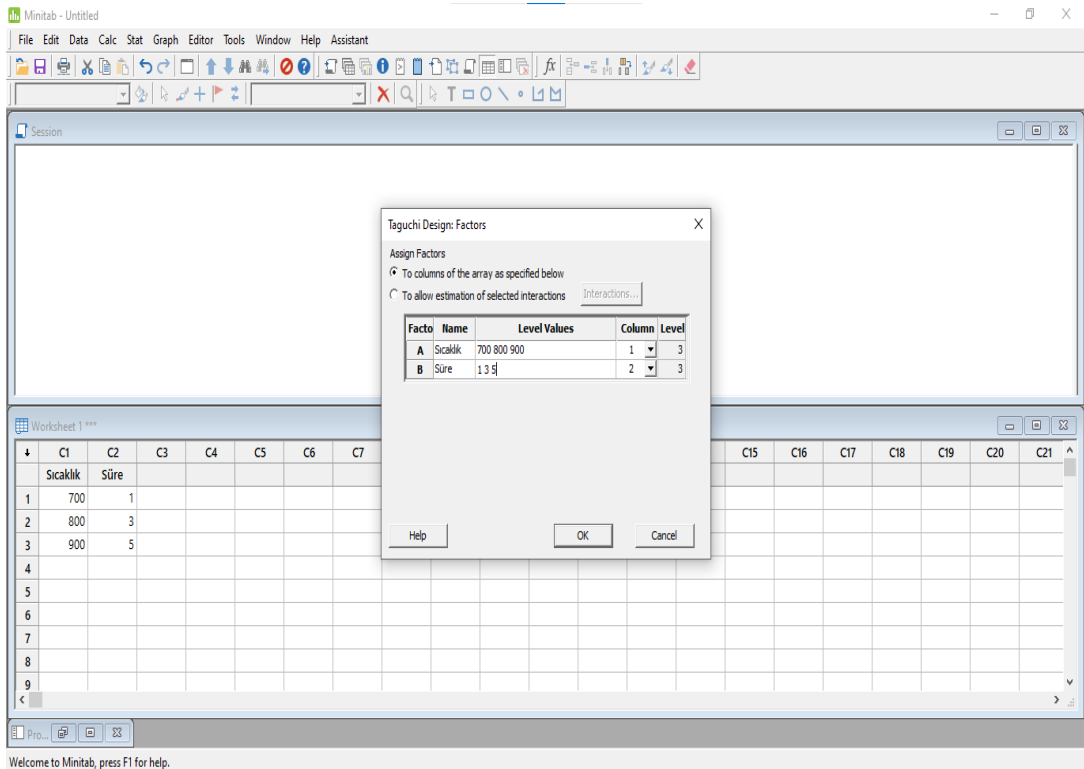
Modelin level sayısı belirlenir.Model 3 sütuna sahip olduğu için level 3 seçilir.2 parametre olduğundan dolayı faktör sayısı 2 seçilir. Şekil 4.2. 'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Bağımsız faktörlerin programa girişi

3. Adım

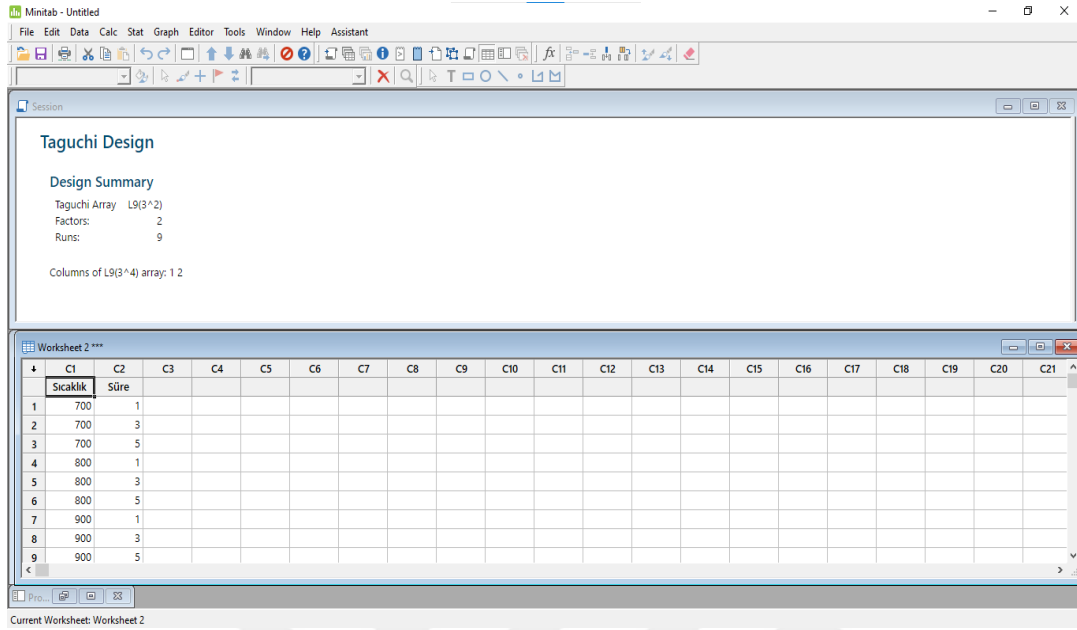
Şekil 4.3.'te dokuz farklı deney gerçekleştir ve sonuçlar elde edilir.



Şekil 4.3. Taguchi deney tasarımı

4. Adım

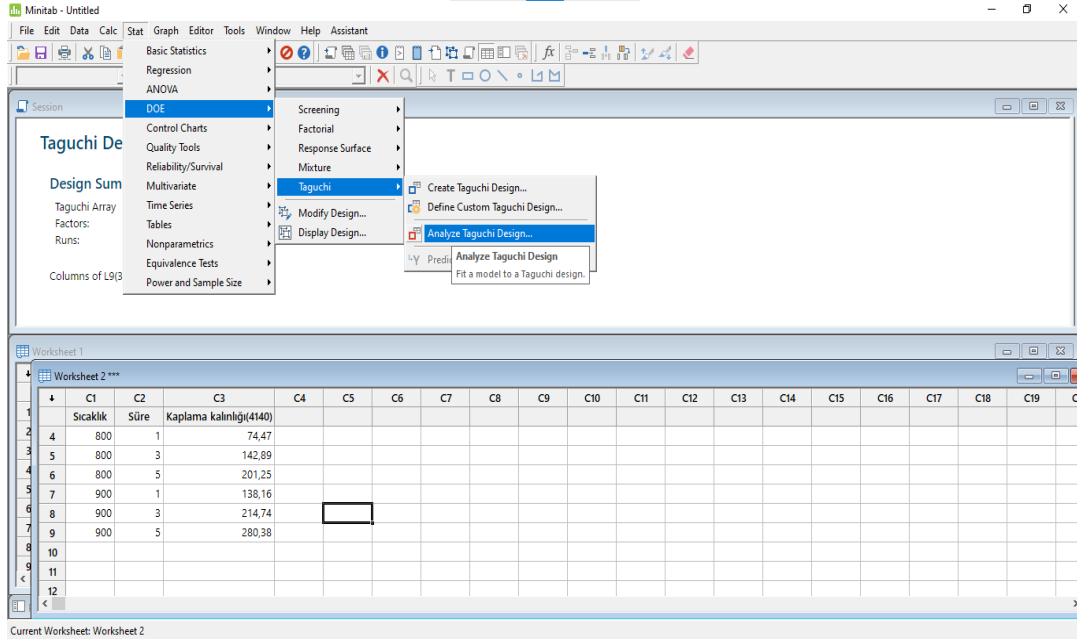
Deney parametrelerine göre sonuçlar Şekil 4.4.'de hesaplanır.



Şekil 4.4. Program arayüzü

5. Adım

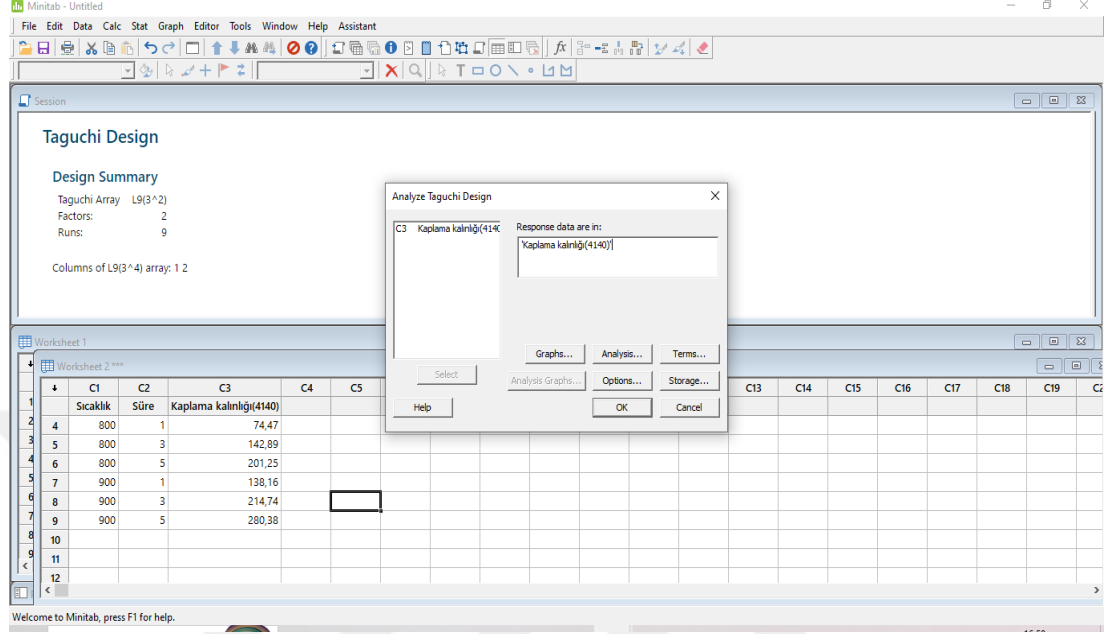
Şekil 4.5.'de, kaplanmış AISI 4140 çeliği için kaplama kalınlığı deney sonuçları girişi yapılır. 'Analyze Taguchi Design' ile sonuç değerleri kullanılır.



Şekil 4.5. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için kaplama kalınlığı Taguchi test üretimlerinin proses çıktı değerleri

6. Adım

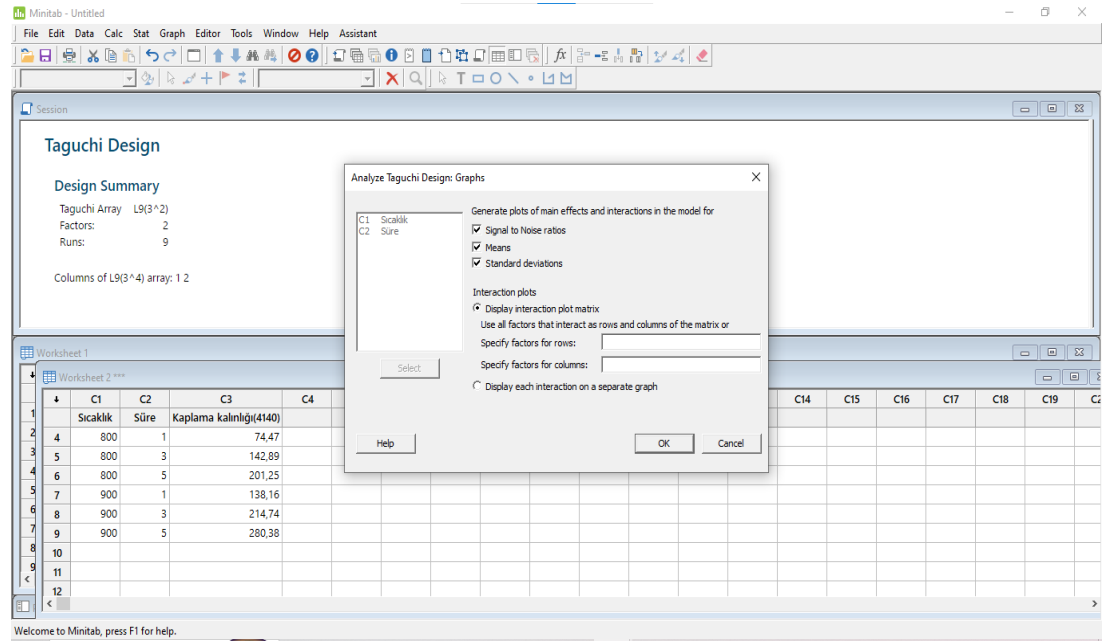
Kaplanmış AISI 4140 çeliği için kaplama kalınlığı deney sonuçlarını kullanmak için kutuya ismi Şekil 4.6.'da tanıtılır



Şekil 4.6. Minitab programı kaplanmış AISI 4140 çeliği için kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarım arayüzü

7.Adım

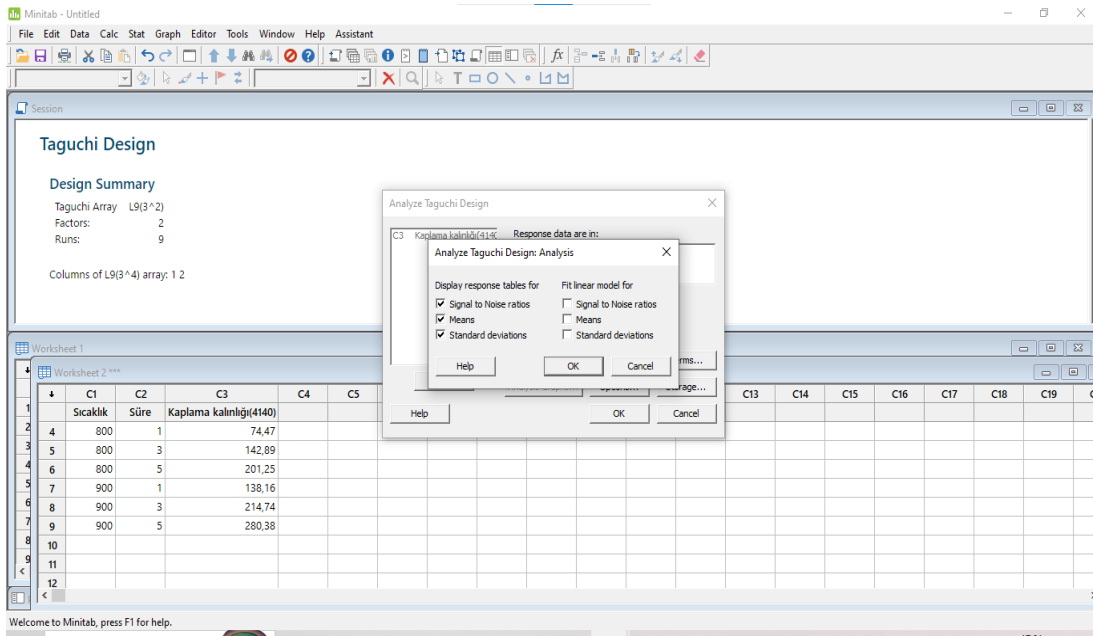
Şekil 4.7.'de performansı ölçülür.



Şekil 4.7. Program arayüzü

8.Adım

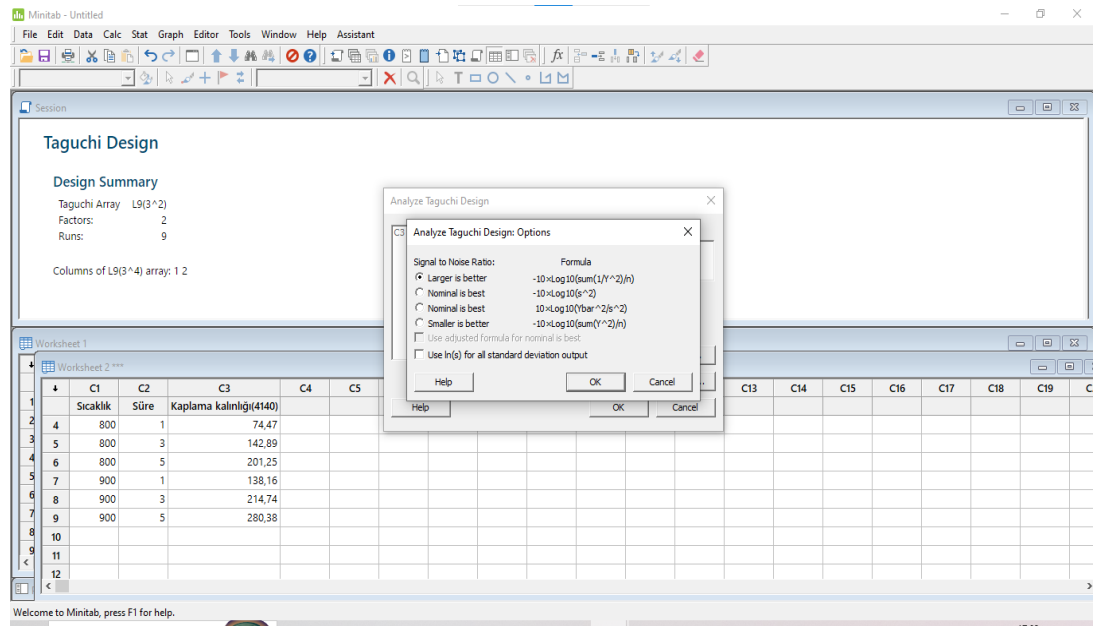
Şekil 4.8.'de ilgili kutular seçilir.



Şekil 4.48. Taguchi deney tasarım arayüzü

9.Adım

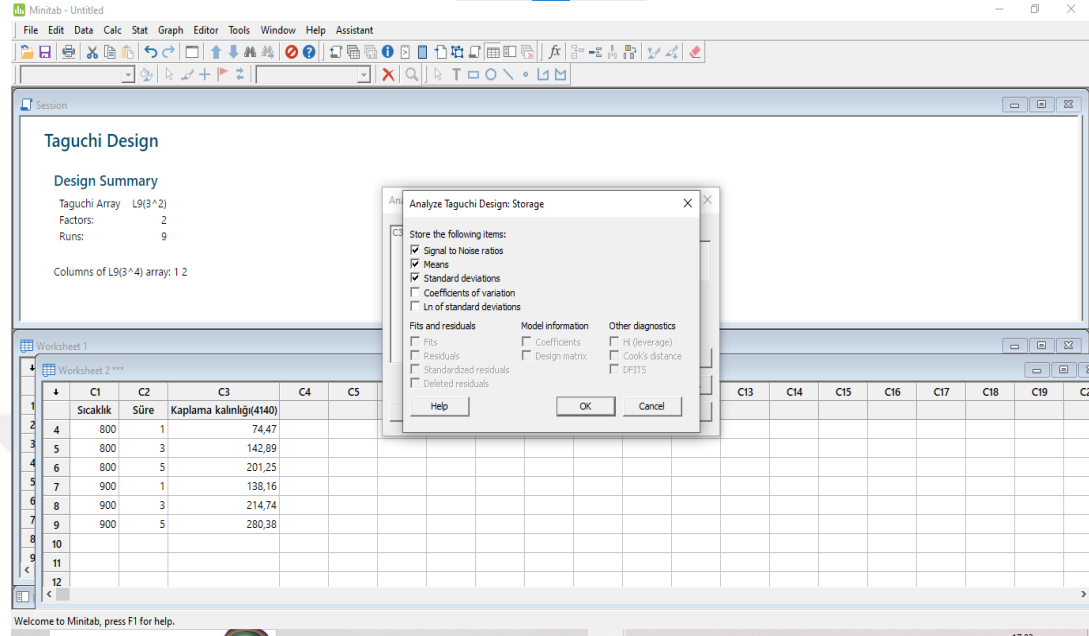
Şekil 4.9.'da 'Larger is better' seçilir.Kullanılan sonuç performans değişkeninde en yüksek skor en iyi kalitede olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.9. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

10. Adım

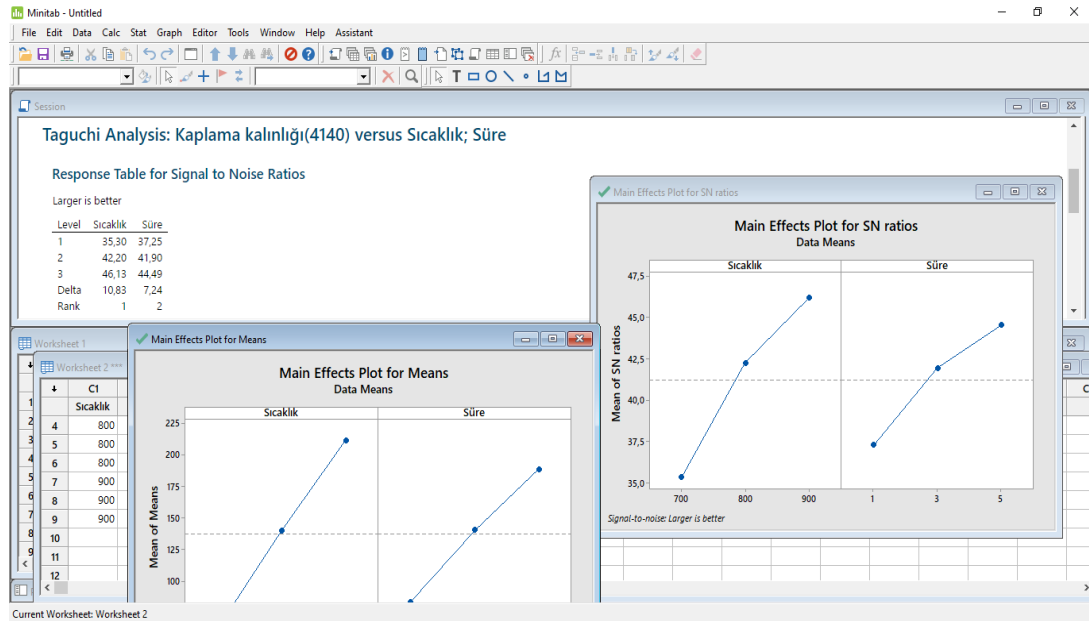
Şekil 4.10.'da Stroj kısmında yer alan kutular seçilir ve beyaz panele bu değerlerin depolanması sağlanır. Program sonuçları depolar.



Şekil 4.10. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

11. Adım

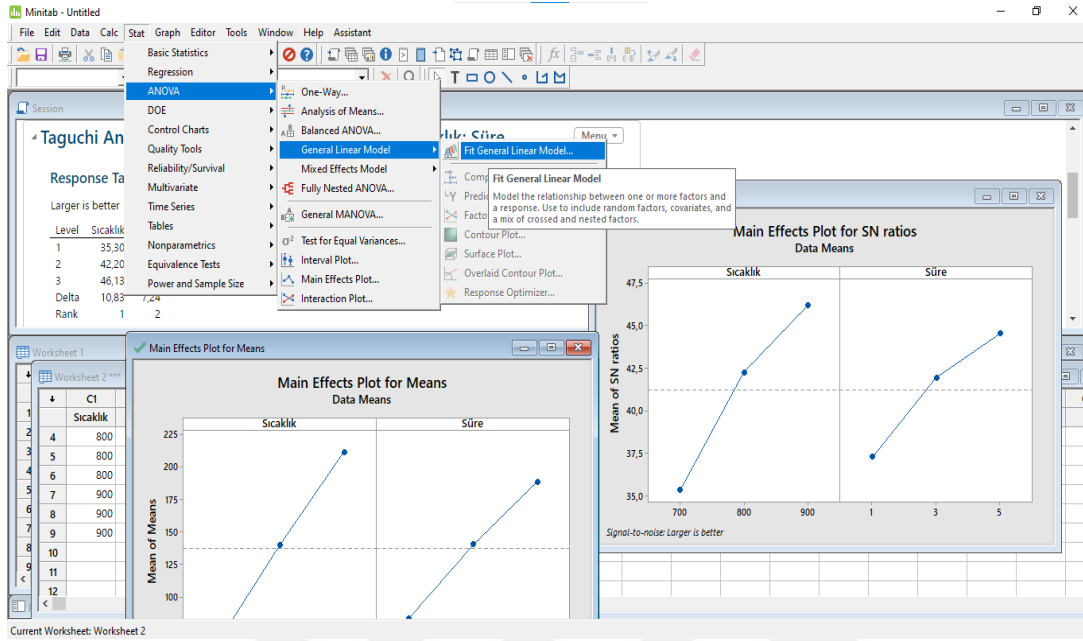
Şekil 4.11.'de, grafiklere karşılık gelen süre ve sıcaklık parametreleri için analiz detayları görülmektedir.



Şekil 4.11. Sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği.

12. Adım

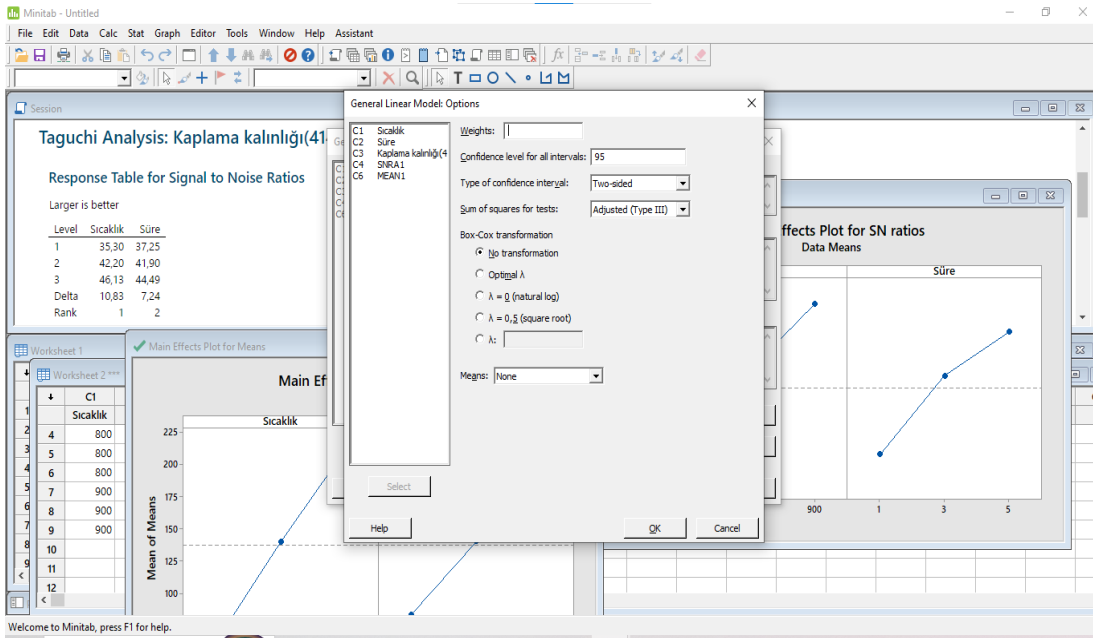
ANOVA testi Şekil 4.12.'de uygulanır.



Şekil 4.12. Minitap programı Anava testi hesaplama arayüzü

13.Adım.

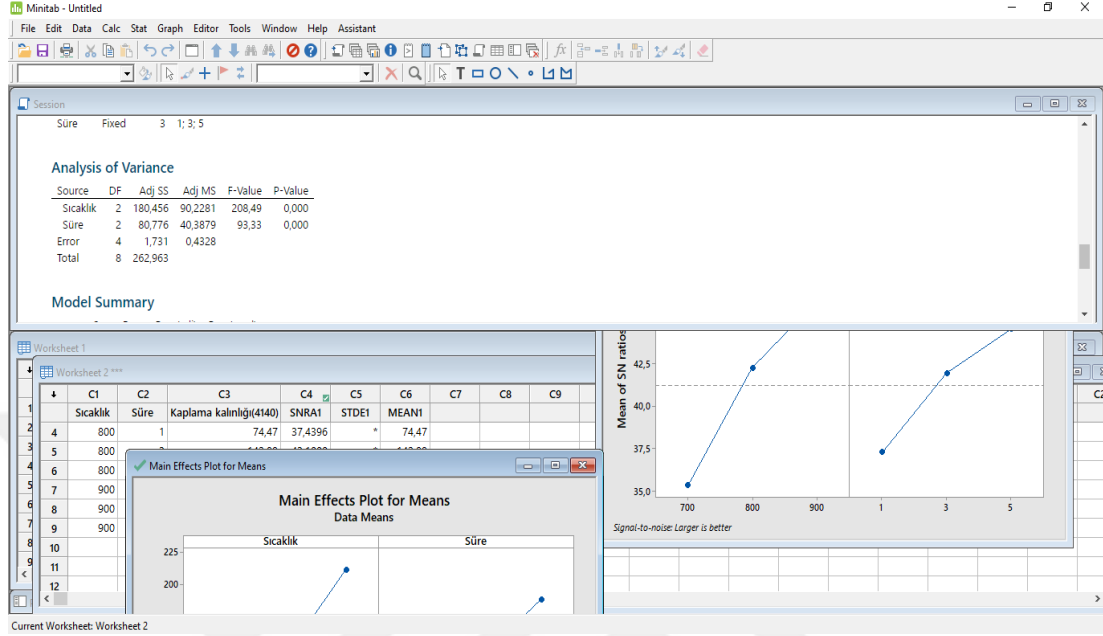
%95 güven aralığında analiz Şekil 4.13.'de görüldüğü gibi yapılır.



Şekil 4.13. Minitap programı Anova testi güven düzeyi analizi

14. Adım

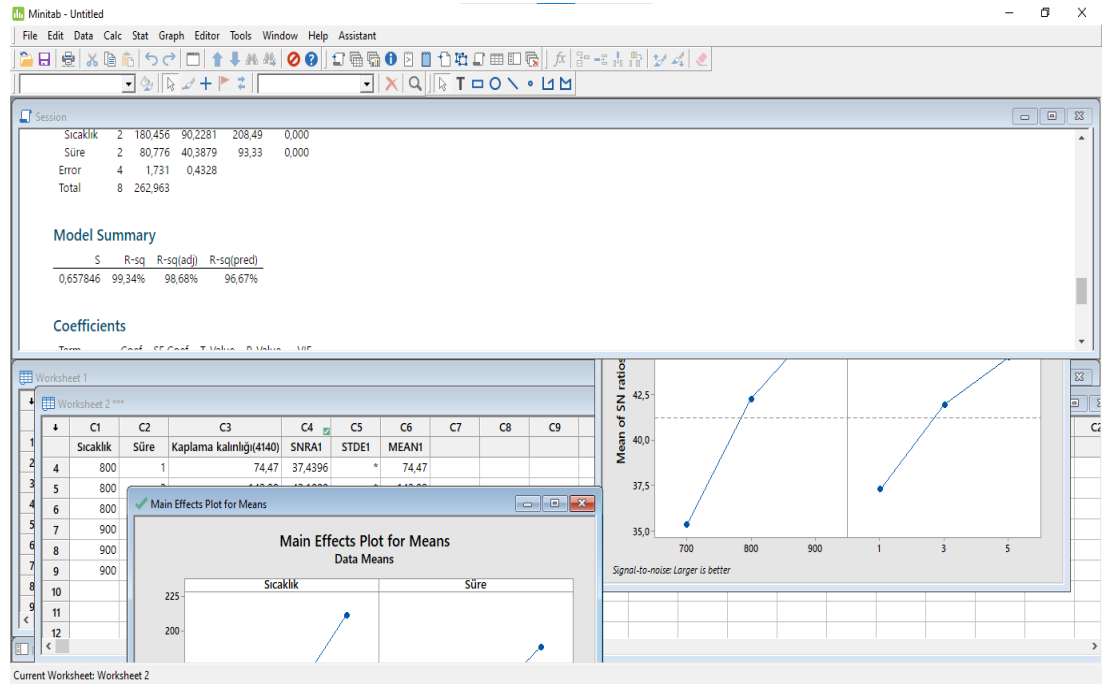
AISI 4140 çeliği F test sonucu, P test sonucu ve model analiz sonuçları Şekil 4.14.’de elde edilir.



Şekil 4.14. F, P testi ve model analiz sonuçları

15.Adım.

Şekil 4.15. ‘de modelin sonucu bulunur. R-kare değeri modelin anlamlılığını açıklar ve bu değer %99,34 bulunmuştur.Model başarılıdır.



Şekil 4.15. R kare değeri ve modelin anlamlılık seviyesi

Şekil 4.16’da kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı analizi yer almaktadır.

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3²)
Factors: 2
Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2

Taguchi Analysis: Kaplama kalınlığı (4140) versus Sıcaklık; Süre

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

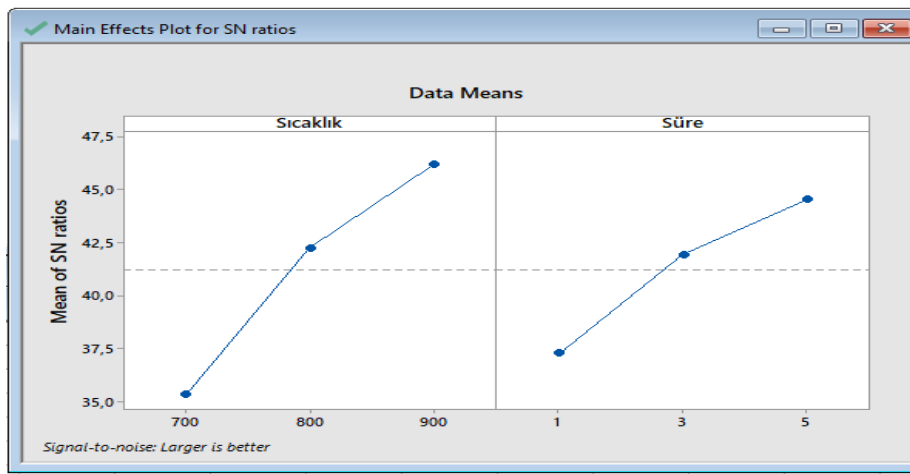
Level	Sıcaklık	Süre
1	35,30	37,25
2	42,20	41,90
3	46,13	44,49
Delta	10,83	7,24
Rank	1	2

Response Table for Means

Level	Sıcaklık	Süre
1	61,32	83,40
2	139,54	140,18
3	211,09	188,37
Delta	149,77	104,97
Rank	1	2

Şekil 4.16. 700 °C, 800°C ve 900 °C’de 1, 3 ve 5 saat süreyle kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı analizi

Kaplanmış AISI 4140 çeliği için Taguchi Deney Tasarımı analizinden S/G (sinyal gürültü oranı) Şekil 4.17’de hesaplanmıştır.



Şekil 4.17. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri

Kaplanmış AISI 4140 çeliği kaplama kalınlığı için yapılan Taguchi deney tasarımına göre Şekil 4.17.'de görüldüğü üzere sıcaklık 800°C'de ve 900°C'de uygundur. Normalin altında kalmasından ötürü 700°C uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak 3 saat ve 5 saat kabul edilebilir değerlerdir. Süre 1 saat normalin altında kaldığı için uygun değildir. Bu deneyde 5 saat en uygun süredir. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için yapılan deneyde kaplama kalınlığı sonuçlarına göre sıcaklık için 900°C, süre için 5 saat en uygun değerdir.

Şekil 4.18.'de varyans analizinin model özeti yer almaktadır.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	180,456	90,2281	208,49	0,000
Süre	2	80,776	40,3879	93,33	0,000
Error	4	1,731	0,4328		
Total	8	262,963			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,657846	99,34%	98,68%	96,67%

Şekil 4.18. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Kaplanmış AISI 4140 çeliği kaplama kalınlığı deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanarak R kare değeri % 99,34 hesaplanmıştır. Modelin anlamlı olup olmadığını R kare değeri açıklar. R kare değerine bakıldığında model başarılıdır. 'P' değeri 0,005'in altında başarılı sayılmaktadır. 'P' değeri sıcaklık için 0,000 hesaplanmıştır. Süre 0,000 bulunmuştur. Sıcaklık ve süre değeri ikisi aynı derecede doğru değeri veren değişkendir.

'F' değeri 208,49 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 93,33 olarak hesaplanmıştır. 'F' değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğu anlamına

gelir. Yapılan bu deney için sıcaklık birinci derecede önemli parametre, süre ise ikinci derecede önemli parametre olduğu gözlenmiştir.

4.6. Kaplanmış AISI D2 Çeliği Kaplama Kalınlığı Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli

Tablo 5.8.'de kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı değişimler yer almaktadır.

Tablo 4.8. Kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı değişimler

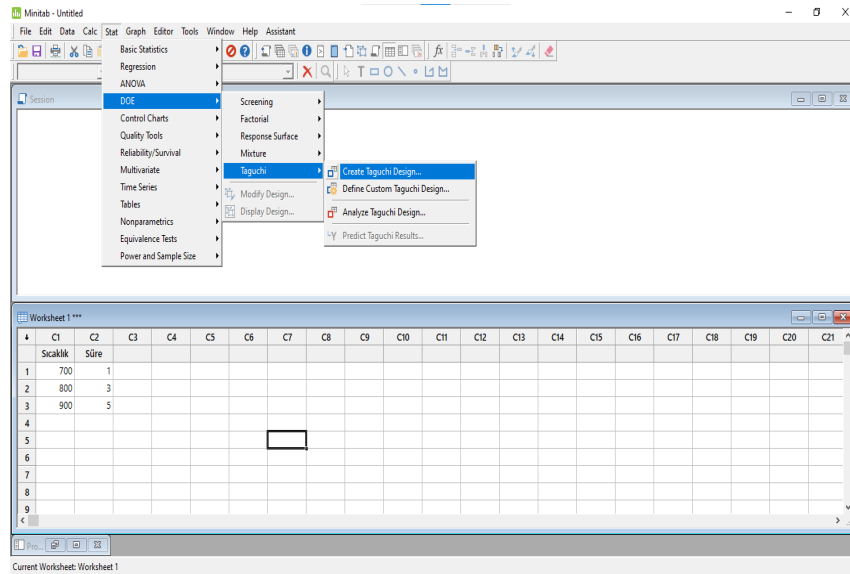
Kaplama kalınlığı (μm)									
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI D2	35,45	59,45	72,77	52,59	142,74	202,62	166,16	284,51	346,33

Tablo 4.8.'de L9 ortogonal dizini kombinasyonları için test gerçekleştirilmiştir.

Minitab programında yapılan çalışmanın analiz işlem adımları aşağıda açıklanmıştır.

1.Adım.

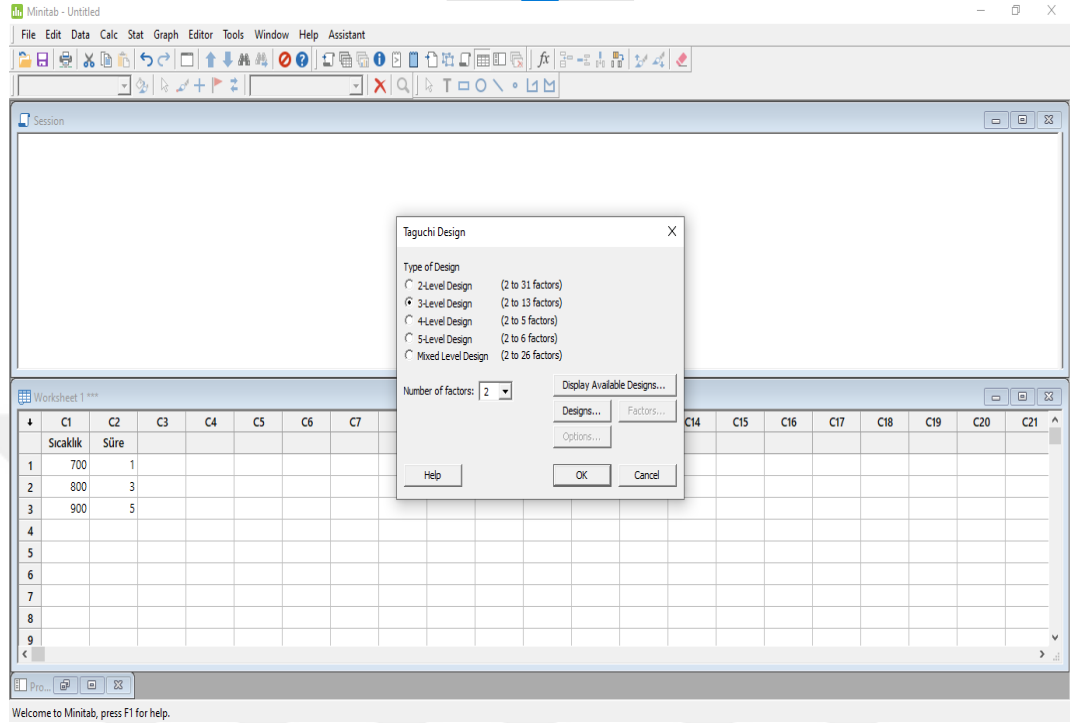
Şekil 4.19.'da görüldüğü gibi, Minitab programı açılır, parametre isimleri ve değerleri girilir. DOE - TAGUCHI-CREATE TAGUCHI – DESIGN tıklanır.



Şekil 4.19. Minitab programı taguchi deney tasarımı açılış arayüzü.

2.Adım

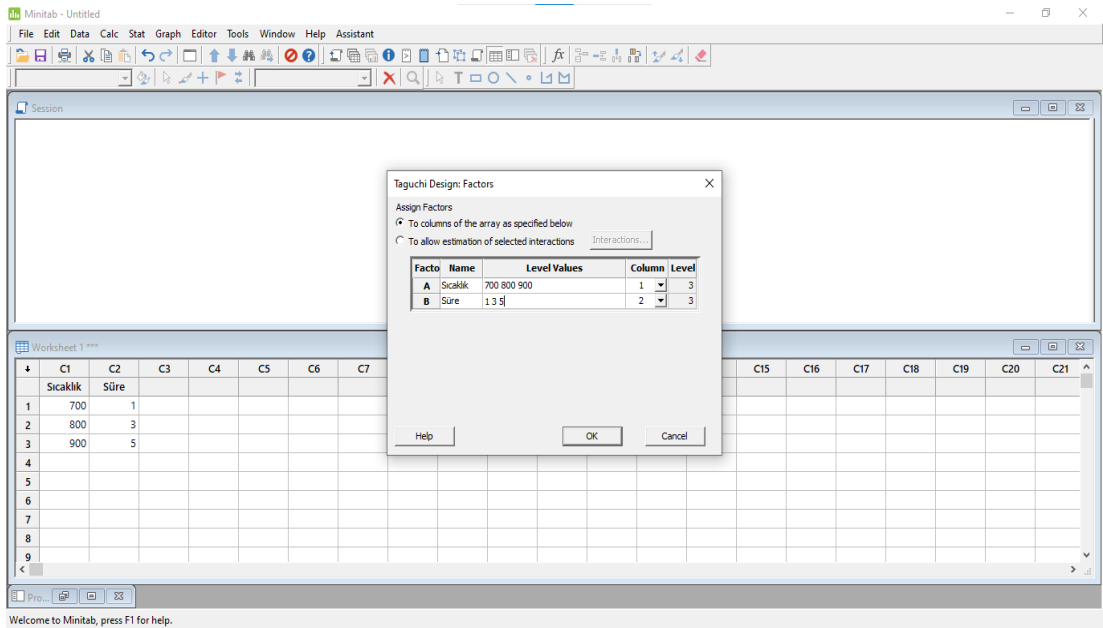
Şekil 4.20.'de modelin level sayısı belirlenir.Kurulan model 3 sütuna sahip olduğu için level 3 seçilir. Parametresayısı 2 olduğu için faktör sayısı 2 seçilir.



Şekil 4.20. Faktörlerin programa tanıtılması

3. Adım

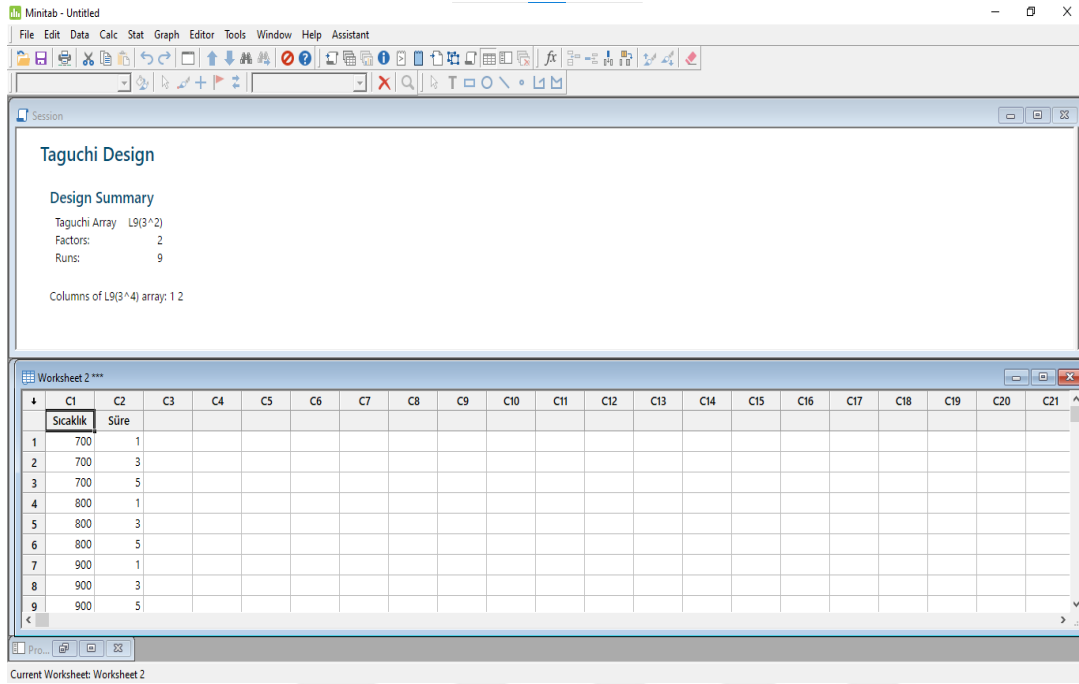
Şekil 4.21.'de program dokuz farklı deney üretir ve sonuçlar elde edilir.



Şekil 4.21. Taguchi deney tasarımı deney sayısı

4. Adım

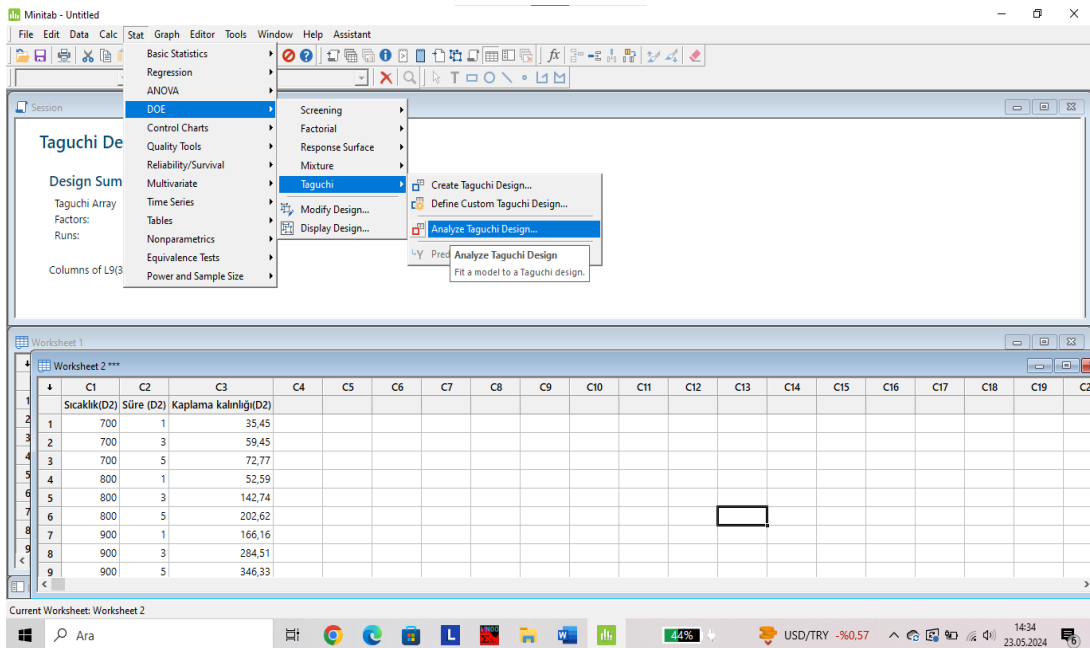
Deney parametrelerine göre sonuçlar Şekil 4.22.'de hesaplanır.



Şekil 4.422. Minitab programı taguchi deney tasarımı deney sayısına göre sonuç arayüzü.

5. Adım

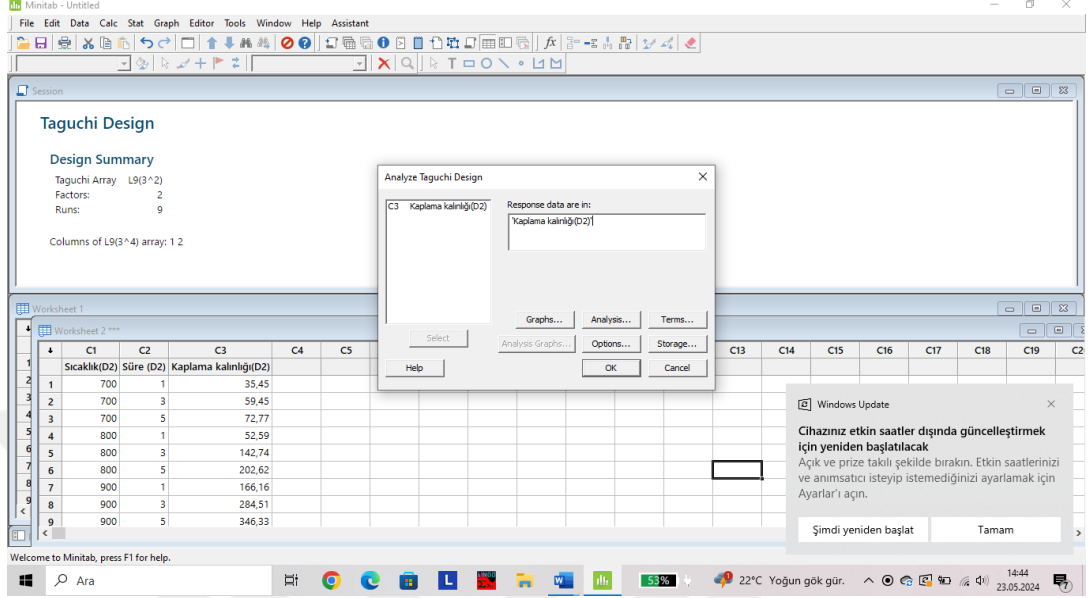
Şekil 4.23.'de Kaplanmış AISI D2 çeliği için kaplama kalınlığı deney sonuçları girilir, 'Analyze Taguchi Design' ile sonuç değerleri işlenir.



Şekil 4.23. Taguchi test üretimlerinin proses çıktı değerleri.

6. Adım

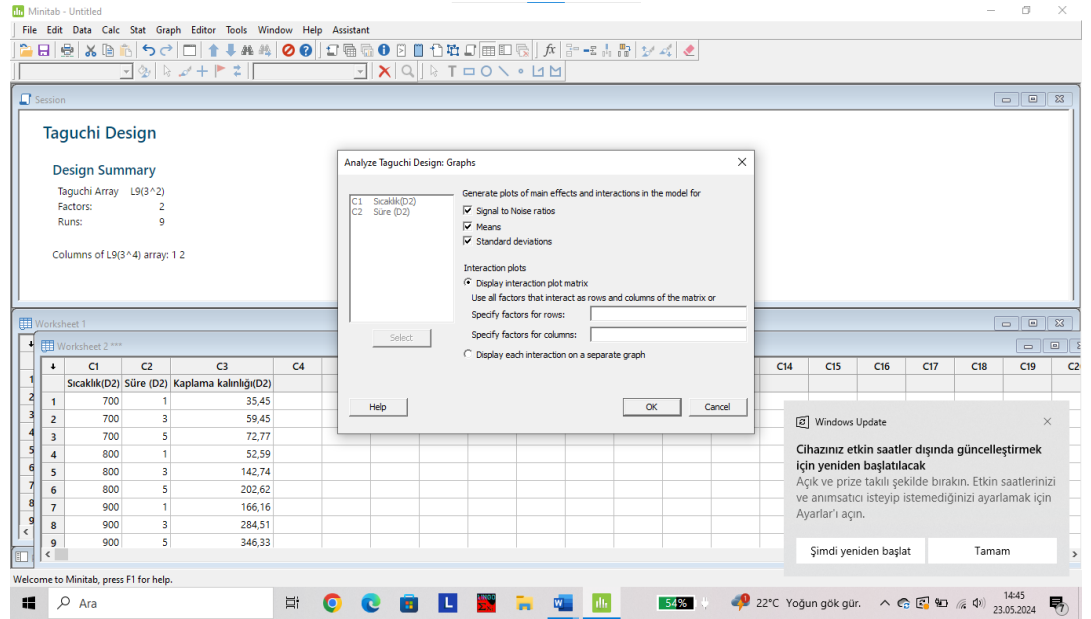
Şekil 4.24.'de Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı deney sonuçlarının kullanılması için kutuya ismi tanıtılır.



Şekil 4.24. Minitab programı kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarım arayüzü.

7. Adım

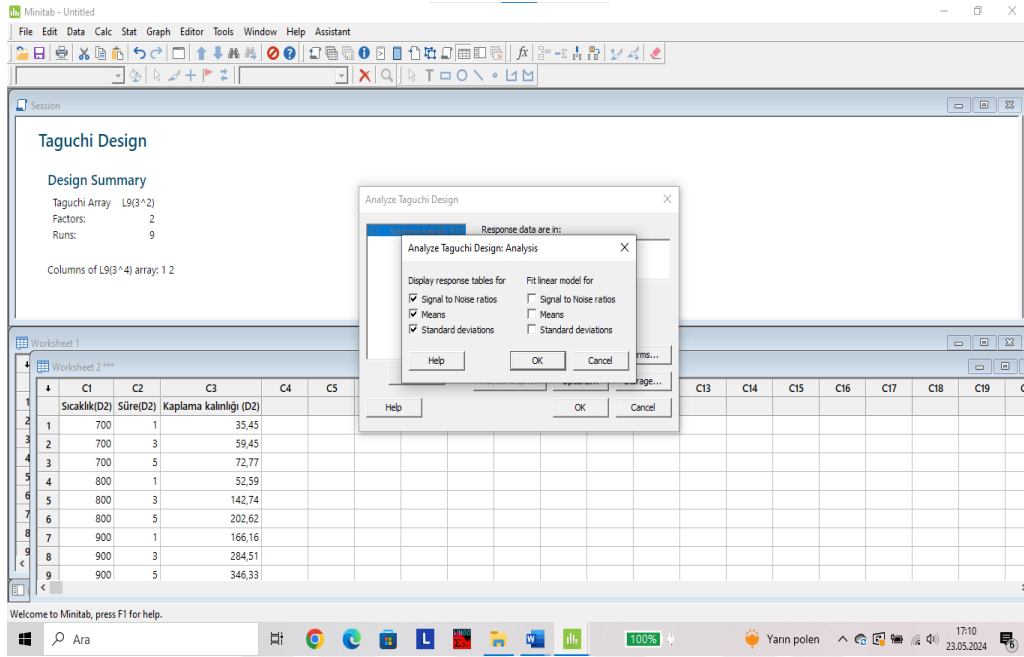
Şekil 4.25.'de performans ölçümü yapılır.



Şekil 4.25. Performans ölçüm aracı arayüzü

8.Adım

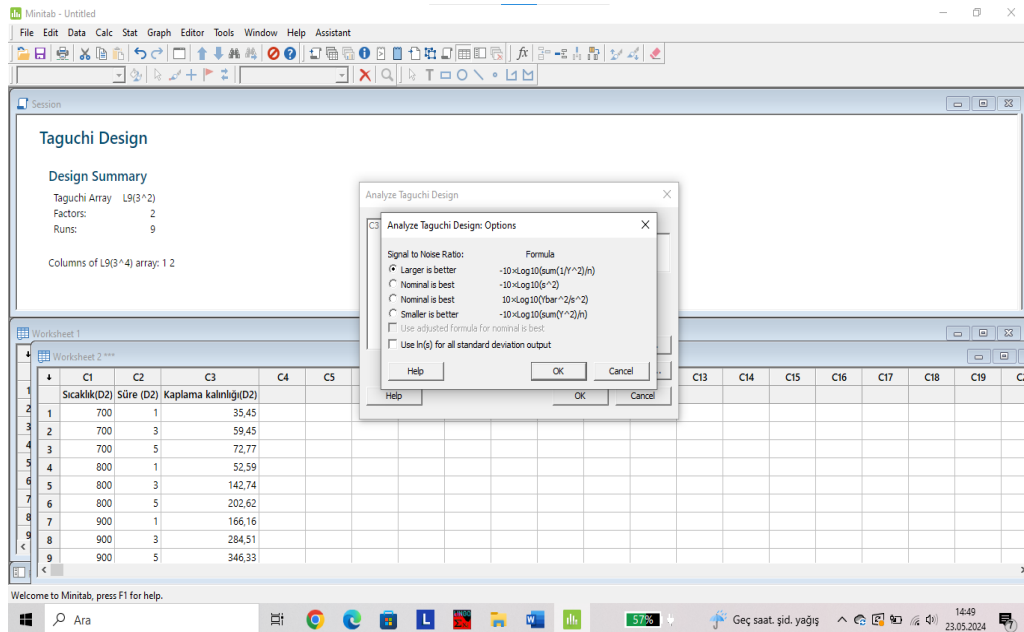
Şekil 4.26.'da ilgili kutular tıklanır.



Şekil 4.26. Taguchi deney tasarım arayüzü

9. Adım

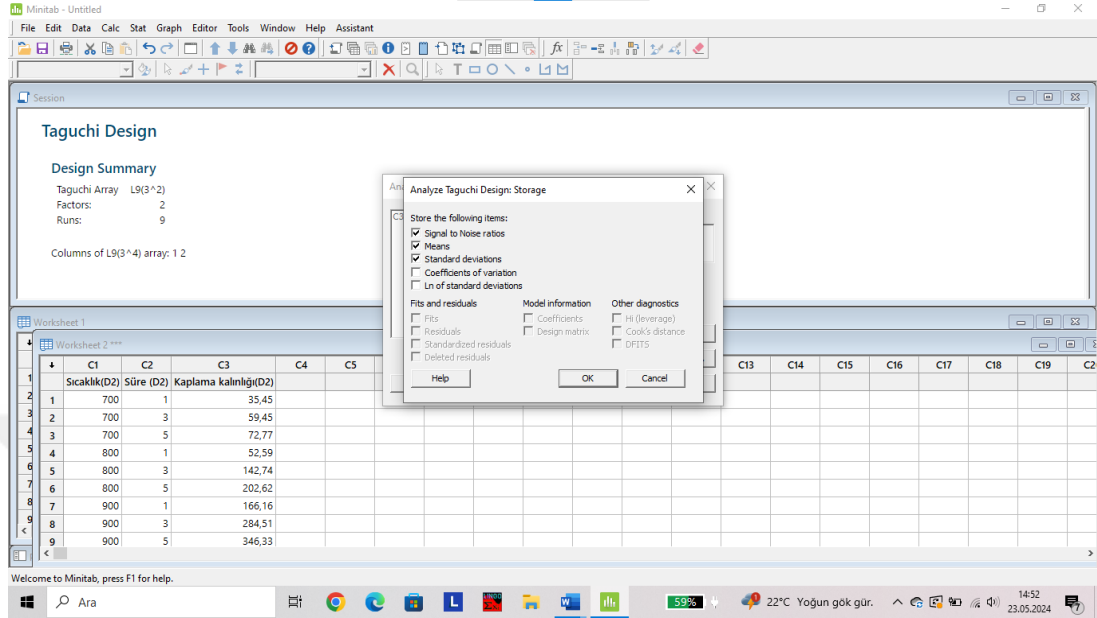
Sinyal gürültü değeri karşılaştırılması Şekil 4.27.'de yapılır. 'Larger is better' seçilir.



Şekil 4.27. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

10. Adım

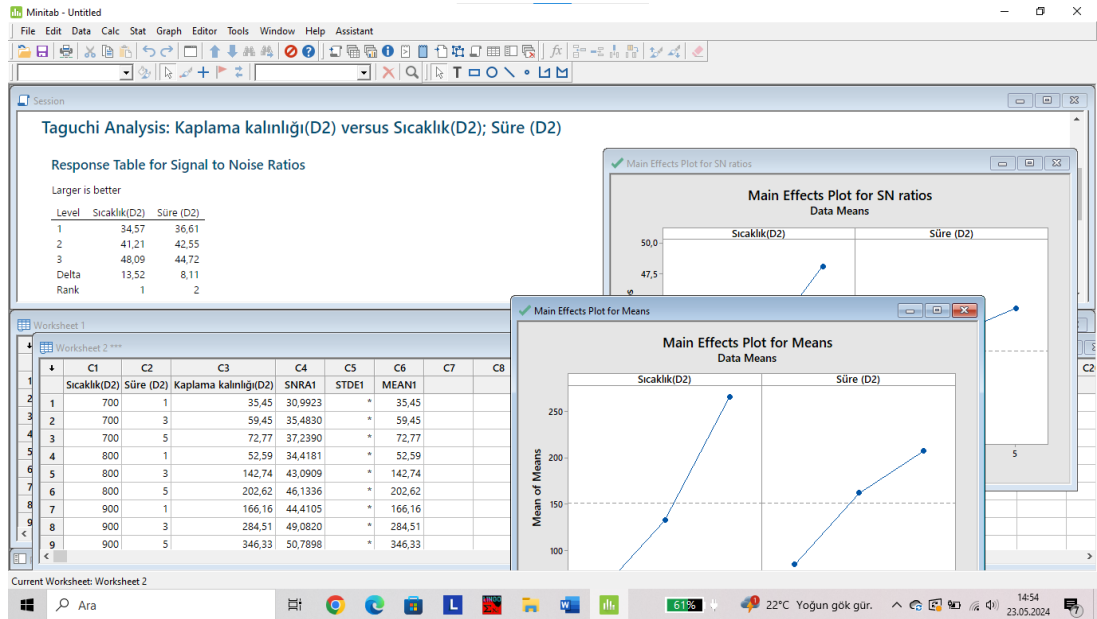
Sinyal/gürültü oranını hesaplamak için Şekil 4.28.'de stroge kısmındaki kutular seçilir ve beyaz panele bu değerlerin depolanması sağlanır. Program bu sonuçları depolar.



Şekil 4.28. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

11. Adım

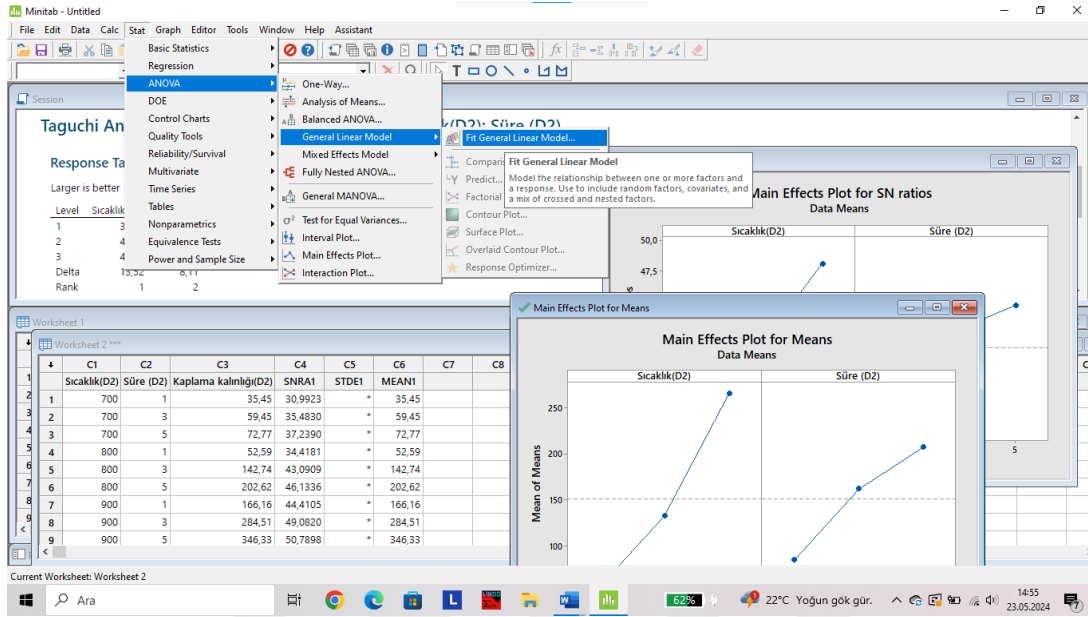
Şekil 4.29.'da kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği bulunmaktadır.



Şekil 4.29. Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği

12. Adım

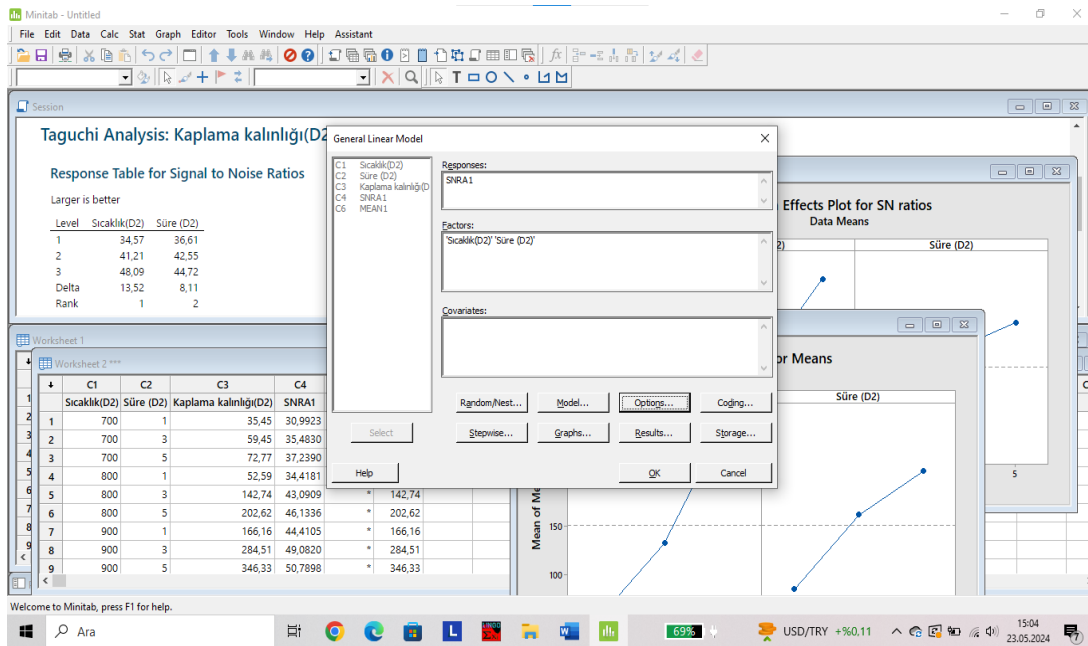
Kalite ölçümü için ANOVA testi uygulaması Şekil 4.30.'da yapılmıştır.



Şekil 4.30. Minitap programı kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı Anava testi hesaplama arayüzü

13. Adım

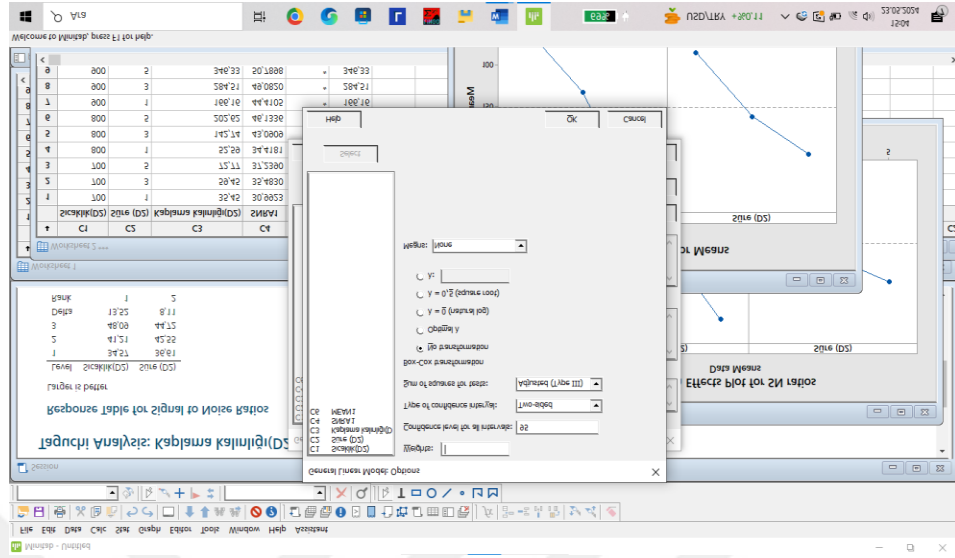
Şekil 4.31.'de kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı deneyi için, sıcaklık ve süre değişkenleri 'factors' kutusuna eklenir.



Şekil 4.31. Anova testi güven düzeyi analizi

14. Adım

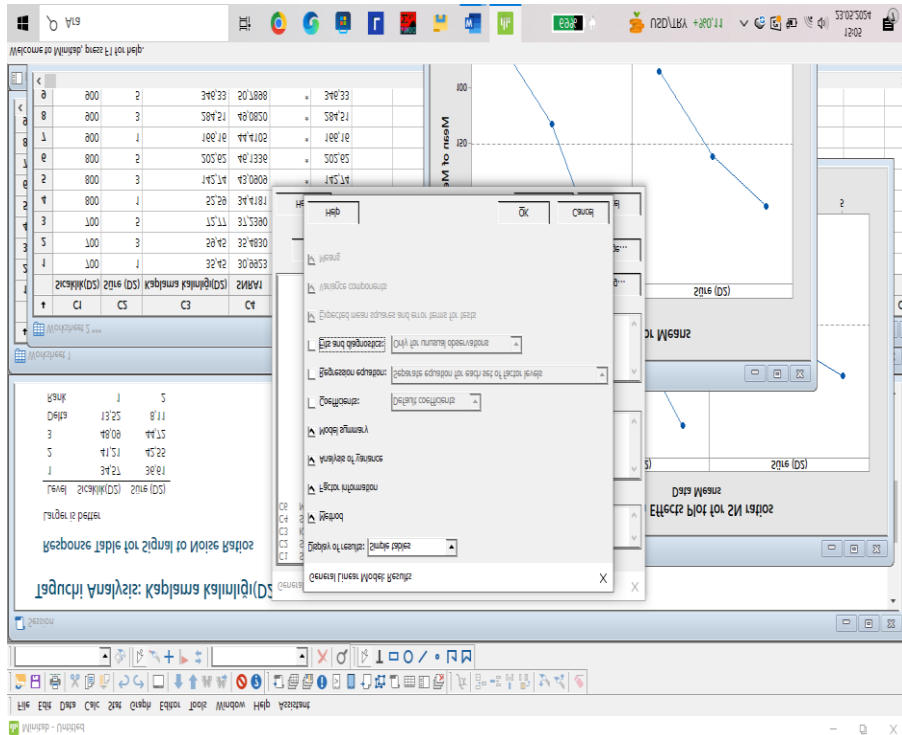
%95 güven aralığında analiz Şekil 4.32.'de yapılır.



Şekil 4.32. Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı F, P testi ve model analiz sonuçları

15. Adım.

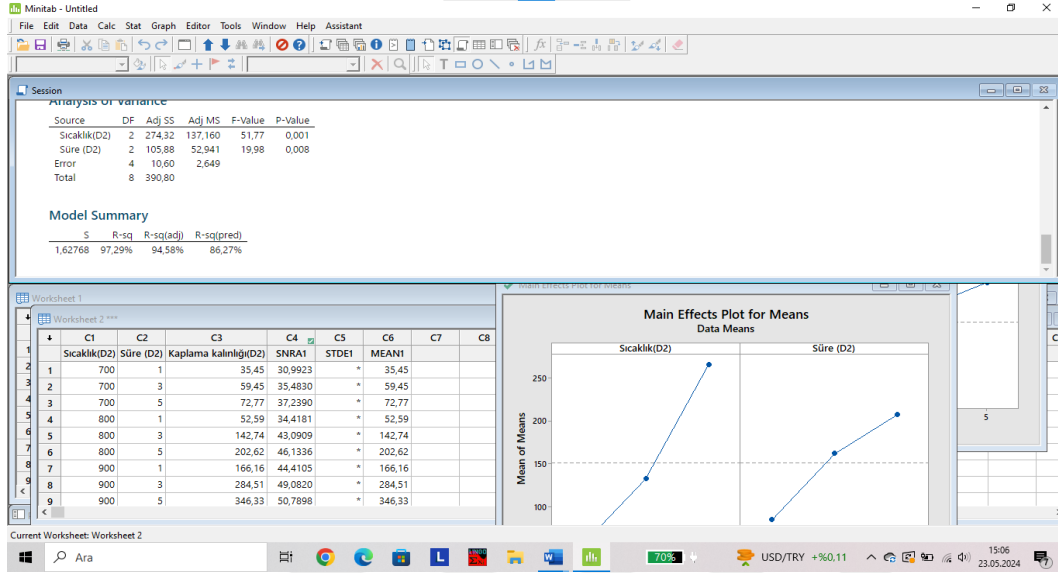
Şekil 4.33.'de sonuç kısmında görmek istenilen tablolar seçilir. 'Model summary' genel itibariyle yeterli olur.



Şekil 4.33. Model summary tablo seçimi

16.Adım.

Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı için oluşturulan modelin sonucu bulunur. R-kare değeri modelin anlamlılığını açıklar ve bu değer Şekil 4.34.'de görüldüğü gibi %97,29 olarak hesaplanmıştır. Modelin başarılı olduğu anlamına gelir.



Şekil 4.34. Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı R kare değeri ve modelin anlamlılık seviyesi

Şekil 4.35.'de kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı analizi yapılmıştır.

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3²)
Factors: 2
Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2

Taguchi Analysis: Kaplama kalınlığı (D2) versus Sıcaklık; Süre

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

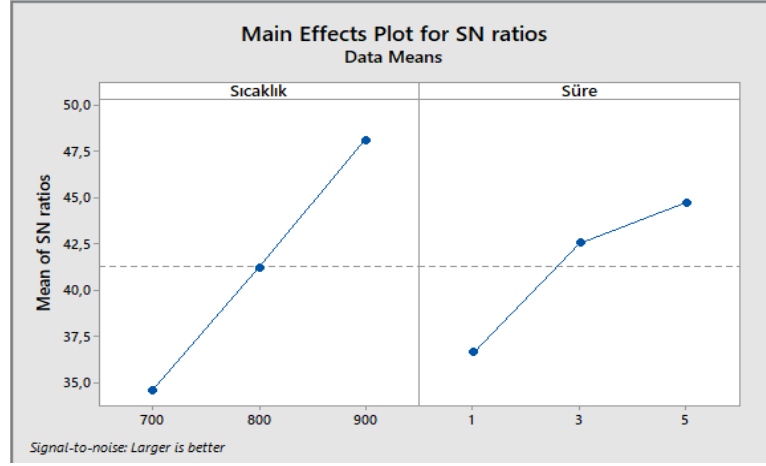
Level	Sıcaklık	Süre
1	34,57	36,61
2	41,21	42,55
3	48,09	44,72
Delta	13,52	8,11
Rank	1	2

Response Table for Means

Level	Sıcaklık	Süre
1	55,89	84,73
2	132,65	162,23
3	265,67	207,24
Delta	209,78	122,51
Rank	1	2

Şekil 4.35. Kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı analizi

Şekil 4.36.'da, kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı için yapılan Taguchi Deney Tasarımı analizinden S/G (sinyal gürültü oranı) hesaplanmıştır.



Şekil 4.36. Kaplanmış AISI D2 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri

Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı için yapılan Taguchi deney tasarımı modelinde Şekil 4.36.'da görüldüğü gibi, sıcaklığın 900°C' de en iyi sonucu verir. 800°C'de ortalama ile çakışık çıkmıştır. Ortalamanın altında olmadığı için bu yine kabul edilebilir bir sıcaklıktır. 700°C çizginin altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak 3 saat ve 5 saat kabul edilebilir değerlerdir. Süre 1 saat çizginin altında kaldığı için uygun değildir. Bu deney için 5 saat en uygun süredir. Kaplanmış AISI D2 çeliği için yapılan bu deneyde kaplama kalınlığı sonuçlarına göre sıcaklık 900°C uygundur.

Aşağıda Şekil 4.37.'de varyans analizinin model özeti görülmektedir.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	274,32	137,160	51,77	0,001
Süre	2	105,88	52,941	19,98	0,008
Error	4	10,60	2,649		
Total	8	390,80			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,62768	97,29%	94,58%	86,27%

Şekil 4.37. Kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Şekil 4.37.'de, kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır. R kare değeri %97,29 çıkmıştır. R kare hesabı modelin anlamlılığını açıklar. Bu değere bakıldığında, model başarılıdır. 'P' değeri 0,005'in altında çıkarsa başarılıdır. 'P' değeri sıcaklık için 0,001 hesaplanmıştır. Süre için 0,008 olarak hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık parametresi en doğru değeri veren değişkendir.

F değerine bakıldığında sıcaklık için 51,77 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 19,98 çıkmıştır. Bunun anlamı 'F' değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre sıcaklık birinci derecede önemli parametredir, süre ise ikinci derecede önemli parametredir.

4.7. Kaplanmış AISI M2 Çeliği Kaplama Kalınlığı Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli

Kaplama kalınlığı değişimler testi Tablo 4.9.'da yapılmıştır. Kaplanmış AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı değerleri yer almaktadır.

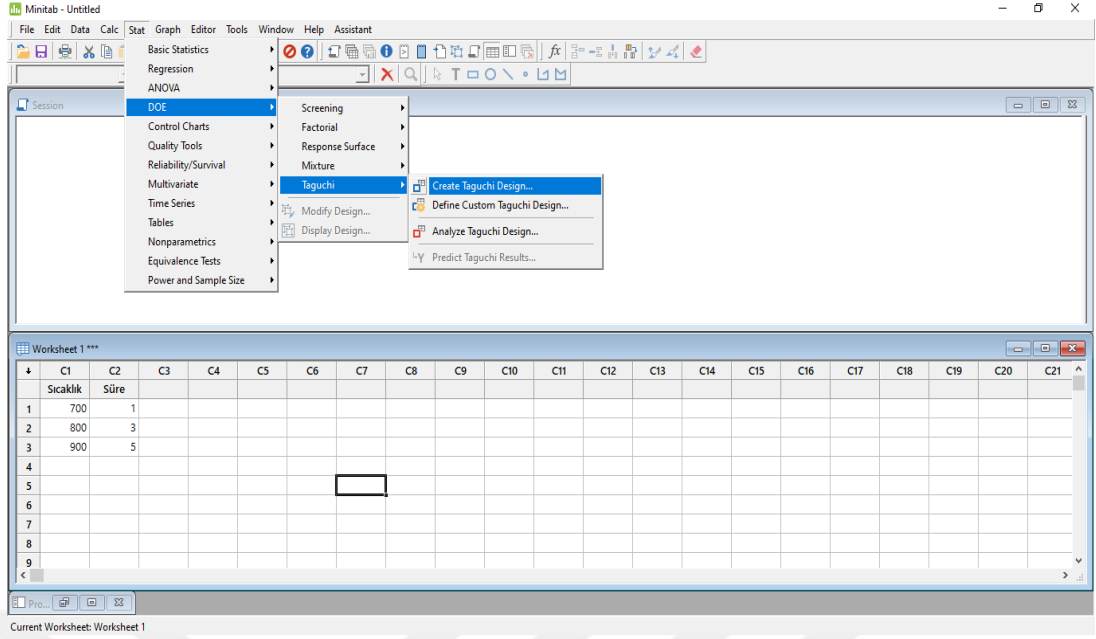
Tablo 4.9. Kaplanmış AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı değişimler

Sıcaklık (°C)	Kaplama kalınlığı (µm)								
	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI M2	33,00	55,59	74,33	71,84	151,28	204,75	155,33	270	336,29

Minitab Programında Analiz İçin İşlem Adımları

1.Adım.

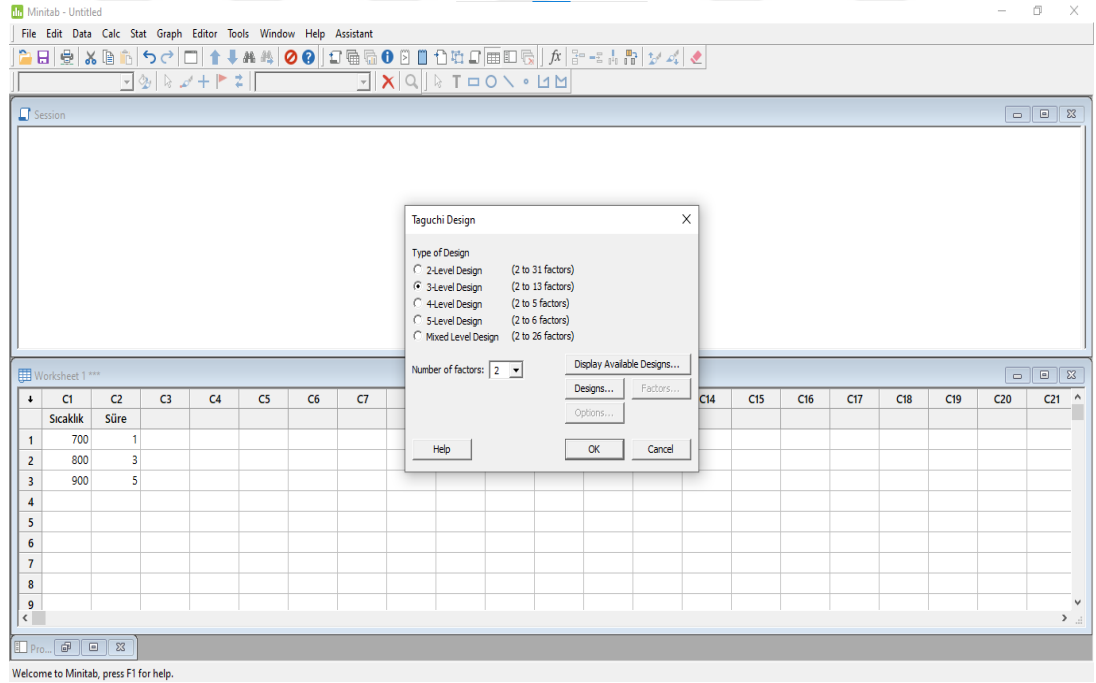
Sıcaklık ve süre parametreleri değerleri Şekil 4.38.'de girilir. DOE - TAGUCHI-CREATE TAGUCHI – DESIGN sırayla tıklanır.



Şekil 4.38. Minitab programı taguchi deney tasarımı başlangıç arayüzü.

2.Adım

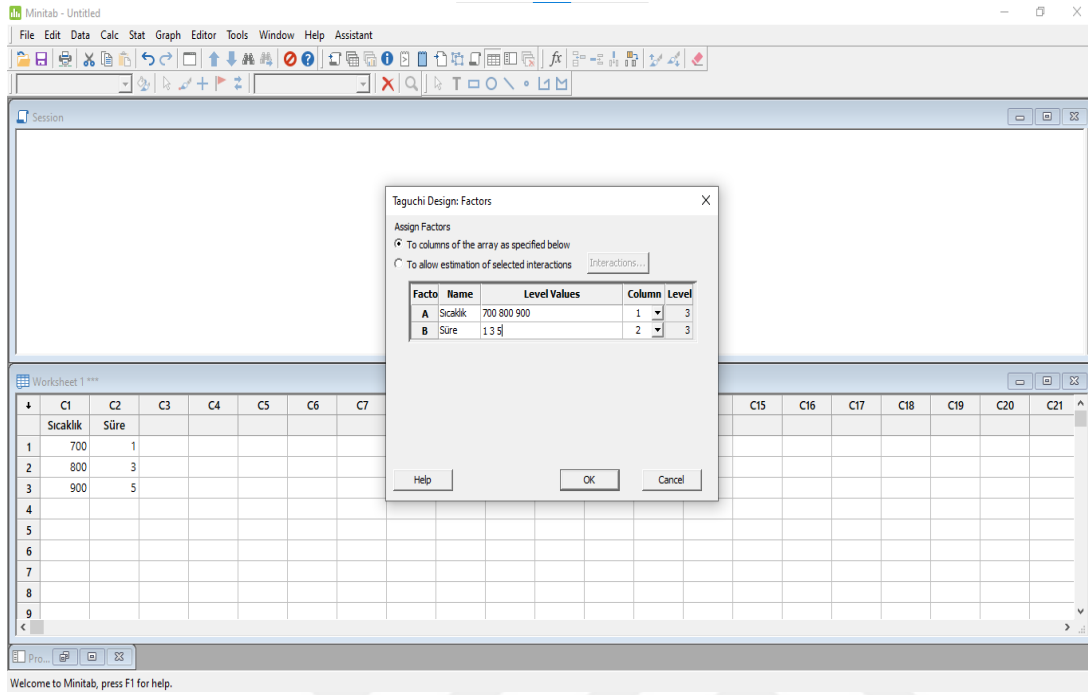
Level sayısı Şekil 4.39.'da belirlenir.Modelimiz 3 sütuna sahip olduğundan dolayı level 3 seçilir.2 parametremiz olduğundan dolayı faktör sayısı 2 seçilir.



Şekil 4.39. Faktörlerin programa girişi

3. Adım

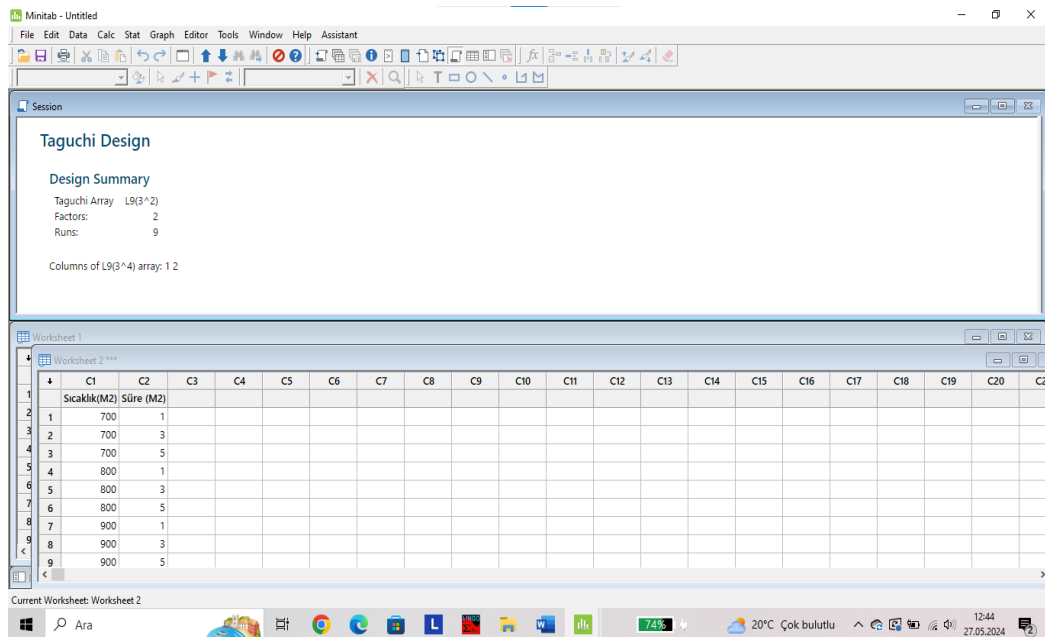
Şekil 4.40.'da dokuz farklı deney gerçekleştirir ve çıktılar buradan elde edilir.



Şekil 4.40. Taguchi deney tasarımı

4. Adım

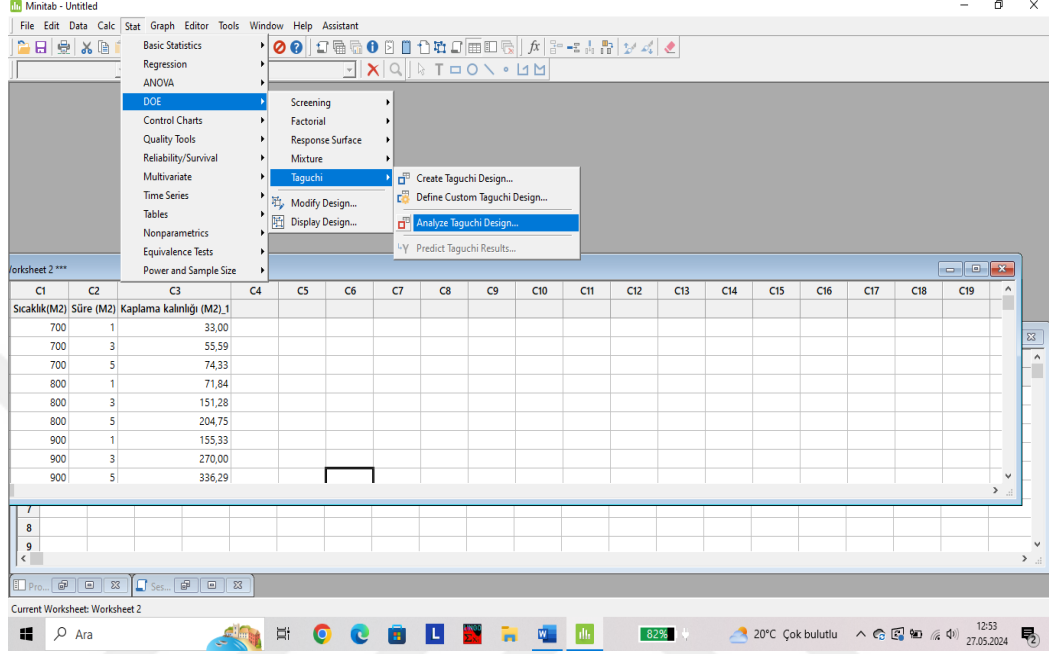
Şekil 4.41.'de deney parametrelerine göre sonuçların ne olacağı hesaplanır.Örneğin 900 derecede, 1 saat süre ile kaplama kalınlığı değeri hesaplanır.



Şekil 4.41. Minitab programı Taguchi deney tasarım sonuçlar arayüzü.

5. Adım.

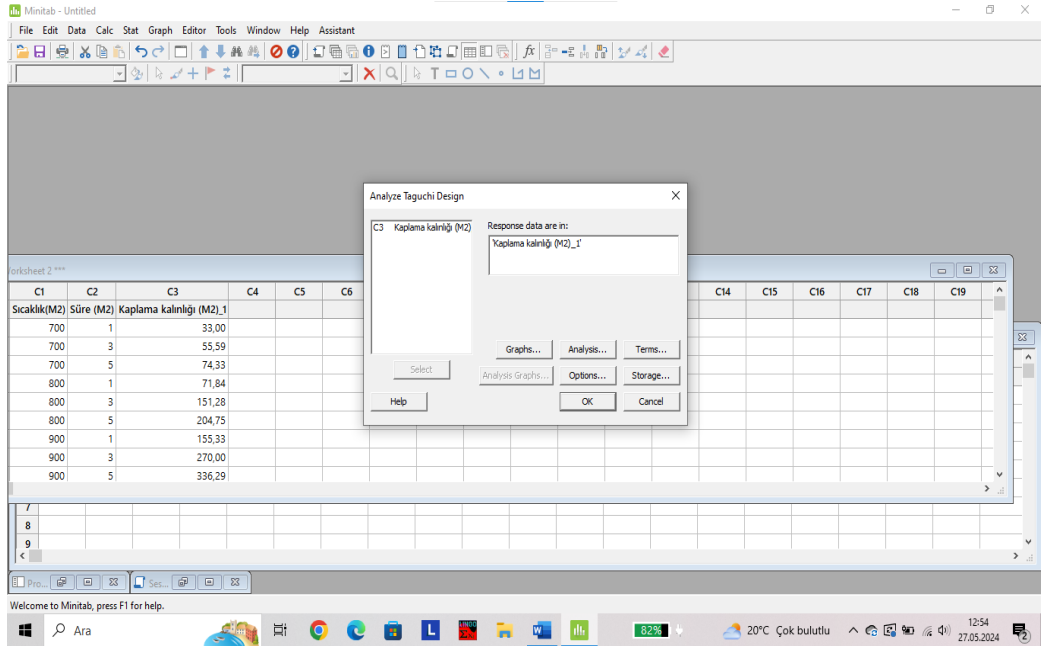
Kaplanmış AISI M2 çeliği için kaplama kalınlığı deney sonuçları Şekil 4.42.'de girilir. Sonuç değerlerimizi kullanmak için 'Analyze Taguchi Design' ile sonuç değerleri kullanılır.



Şekil 4.42. Taguchi test üretimlerinin proses çıktı değerleri

6. Adım

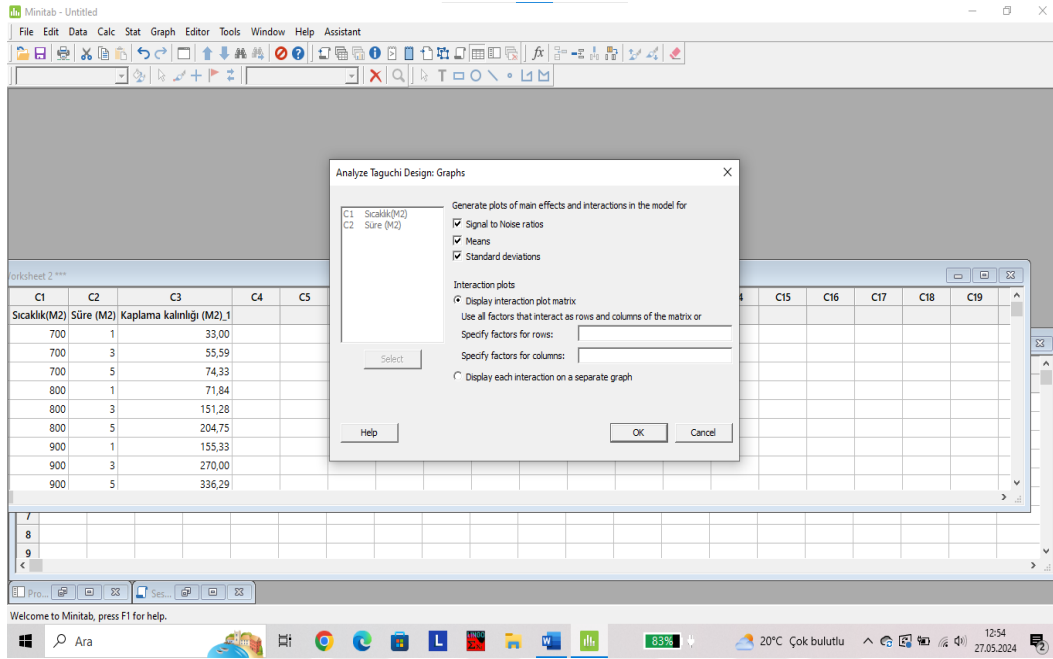
Kaplama kalınlığı deney sonuçları Şekil 4.43.'de tanıtımı yapılır.



Şekil 4.43. Minitab programı kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarım arayüzü.

7.Adım

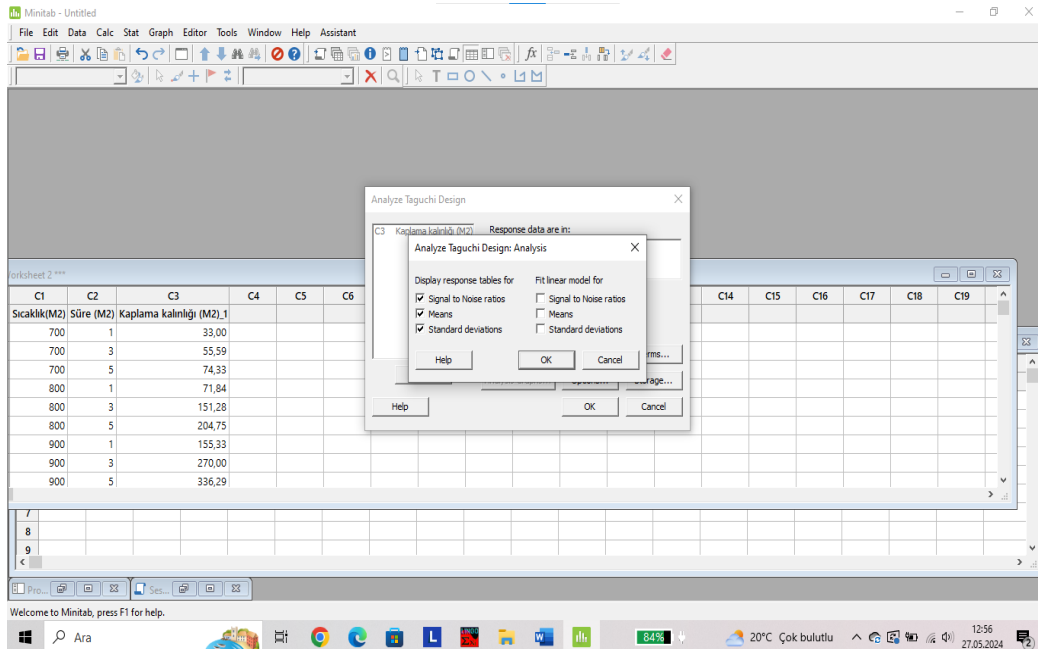
Performans belirleme aracı Şekil 4.44.'de seçilir.



Şekil 4.44. Minitab programı Taguchi deney tasarım arayüzü

8.Adım

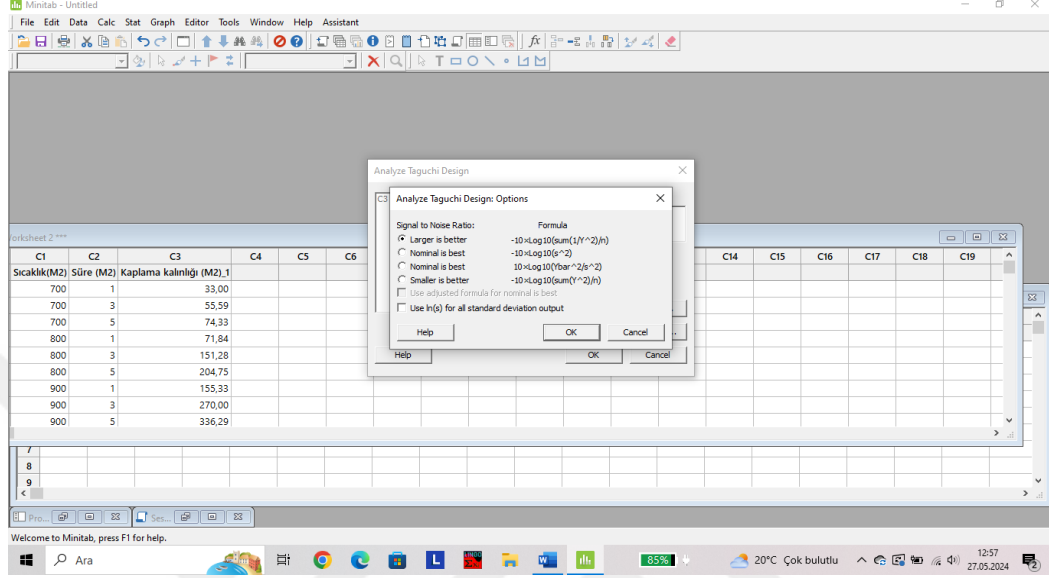
Şekil 4.45.'de ilgili kutular seçilir.



Şekil 4.45. Taguchi deney tasarım arayüzü

9.Adım

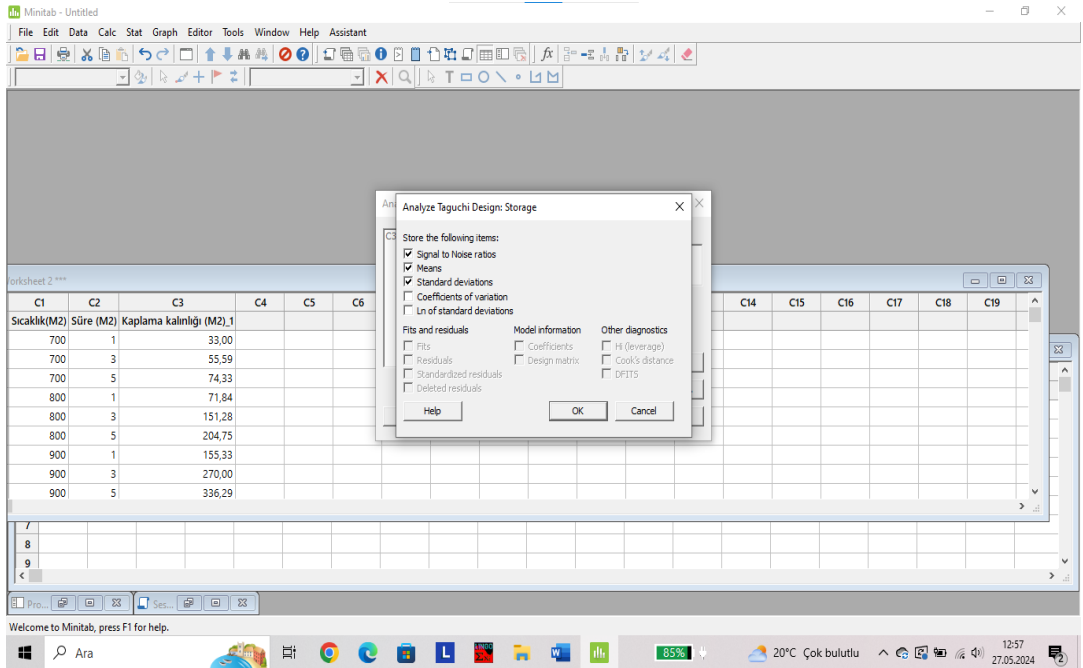
Şekil 4.46.'da sinyal gürültü değeri karşılaştırması için 'Larger is better' seçilir.Kullanılan sonuç performans değişkeninde en yüksek skor en iyi kalitededir anlamına gelir.



Şekil 4.46. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

10. Adım

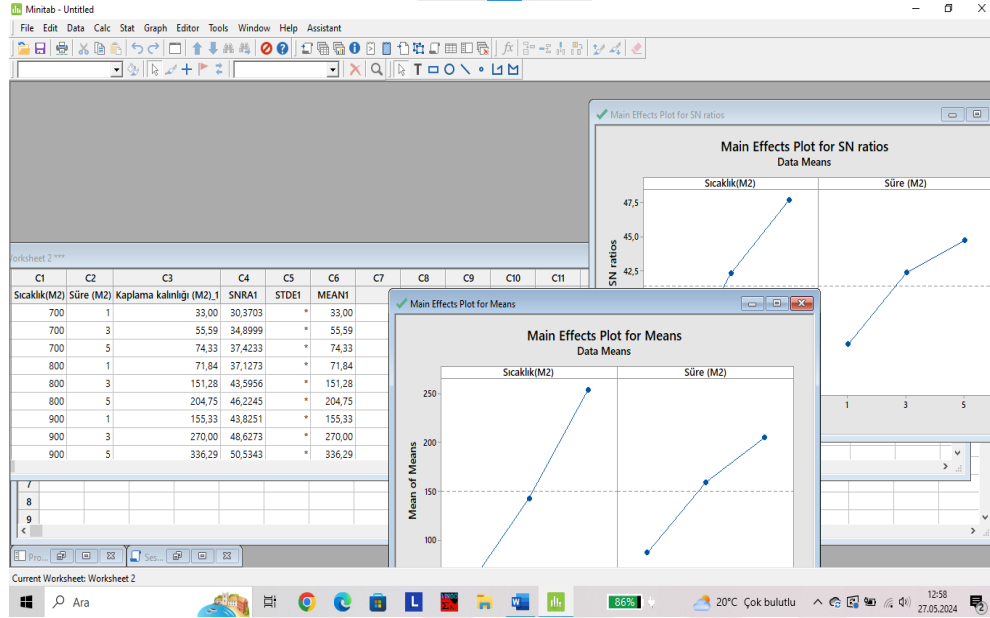
Şekil 4.47.'de stroge kısmındaki kutular seçilir, bu sayede beyaz panele bu değerlerin depolanması sağlanır. Program sonuçları depolama yapar.



Şekil 4.47. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

11. Adım

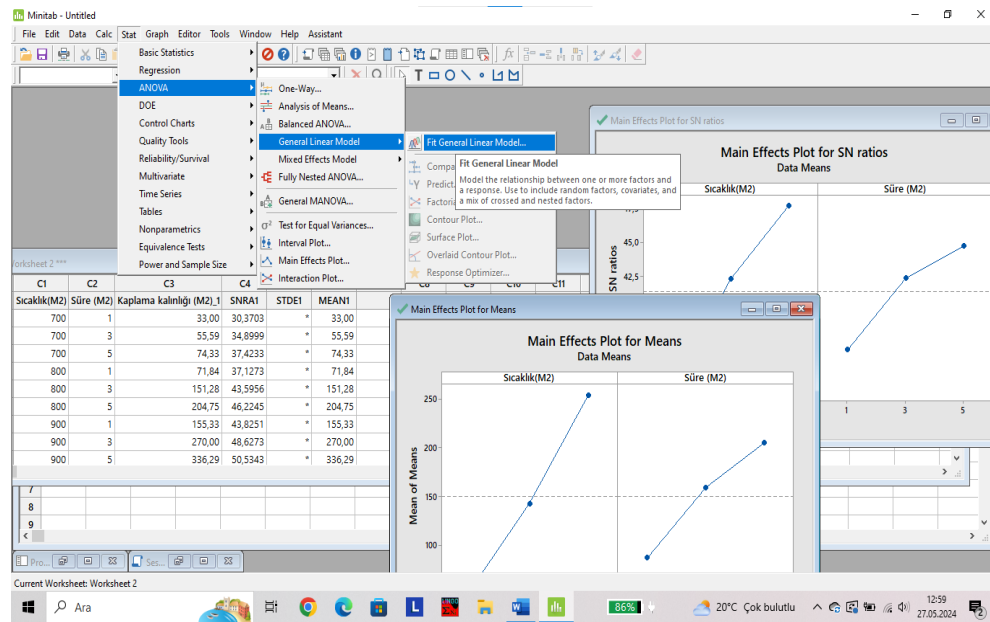
Şekil 4.48.'de kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği bulunmaktadır.



Şekil 4.48. Kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği

12. Adım

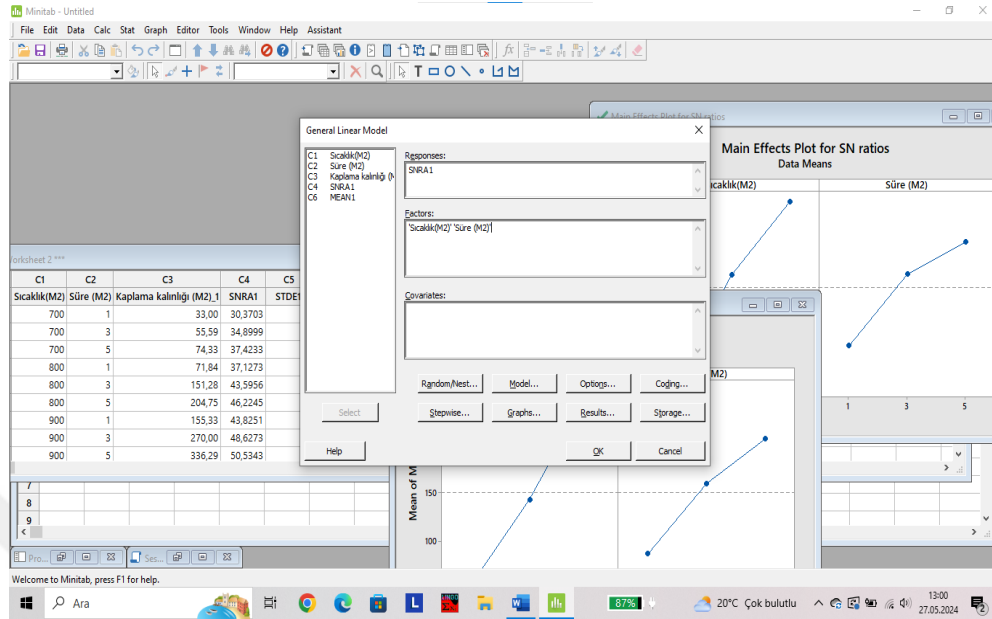
Şekil 4.49.'da kalite ölçümü için ANOVA testi uygulanır.



Şekil 4.49. Minitap programı kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı Anavo testi hesaplama arayüzü

13. Adım

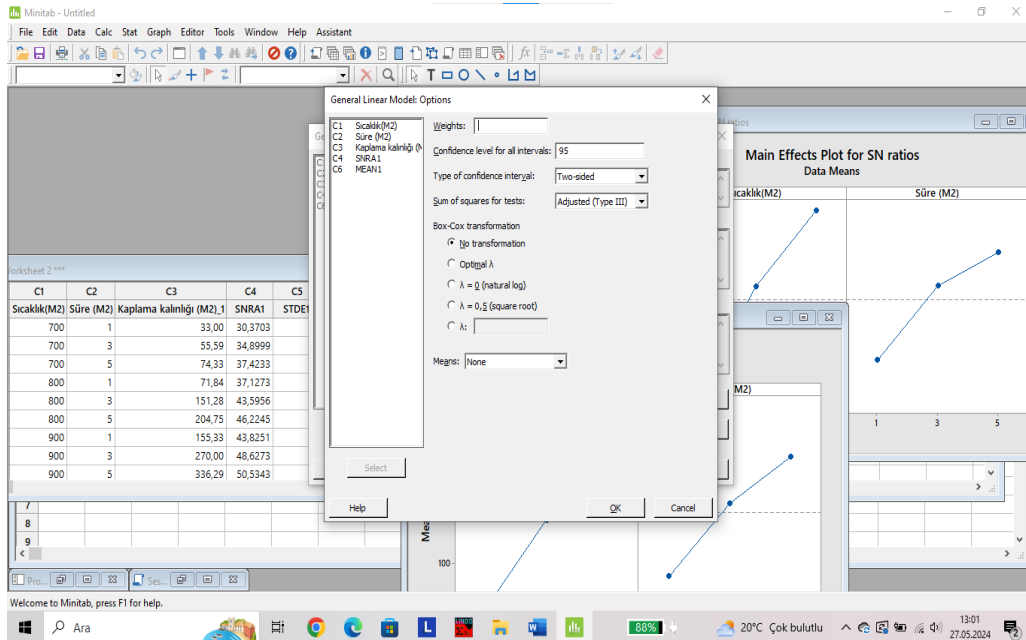
Şekil 4.50.'de iki değişken olan sıcaklık ve süre 'factors' kutusuna eklenir.



Şekil 4.50. Anova testi güven düzeyi analizi

14. Adım

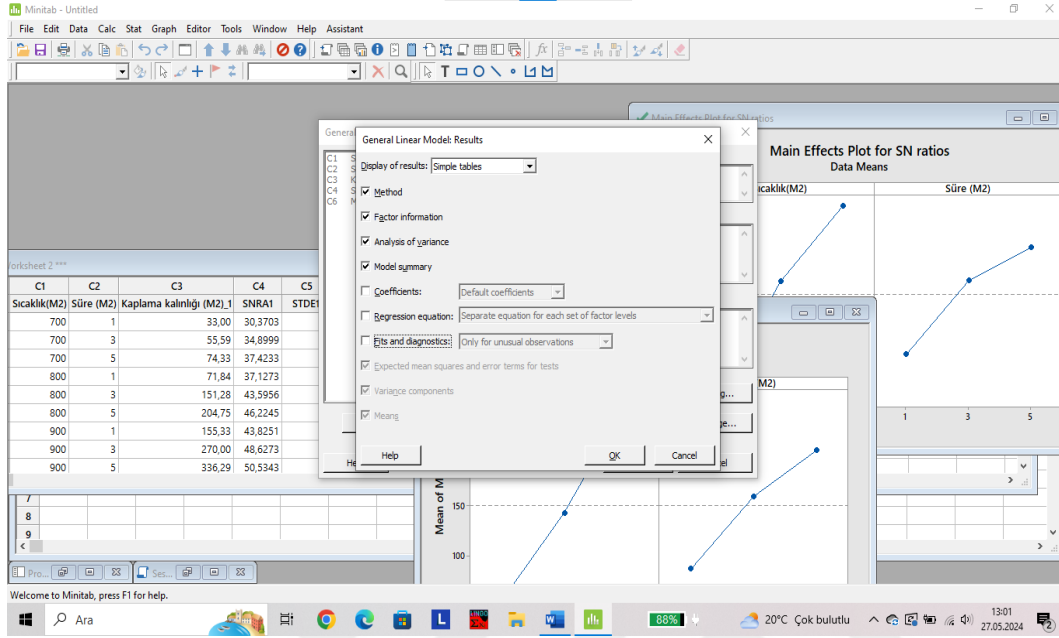
%95 güven aralığında modelin analizi Şekil 4.51'de yapılır.



Şekil 4.51. Kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı için F, P testi ve model analiz sonuçları

15.Adım.

Şekil 4.52.'de sonuç kısmında görmek istenilen tablolar seçilir. 'Model summary' genel itibariyle yeterli olur.



Şekil 4.52. Kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı model summary arayüzü

16.Adım.

Modelin sonucu Şekil 4.53.'de bulunur. R-kare değeri modelin anlamlılığını açıklar ve bu değer %99,42 olarak hesaplanmıştır. Modelin başarılı olduğu anlamına gelir.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre; ... ma kalınlığı (M2)

The following terms cannot be estimated and were removed:
Kaplama kalınlığı (M2)

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	274,339	137,169	281,86	0,000
Süre	2	91,336	45,668	93,84	0,000
Error	4	1,947	0,487		
Total	8	367,622			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,697613	99,47%	98,94%	97,32%

Şekil 4.53. 700 °C, 800°C ve 900 °C’de 1, 3 ve 5 saat süreyle kaplanan, AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Şekil 4.54.'de kaplanmış AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı analizi yapılmıştır.

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3²)
Factors: 2
Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2

Taguchi Analysis: Kaplama kalınlığı (M2) versus Sıcaklık; Süre

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

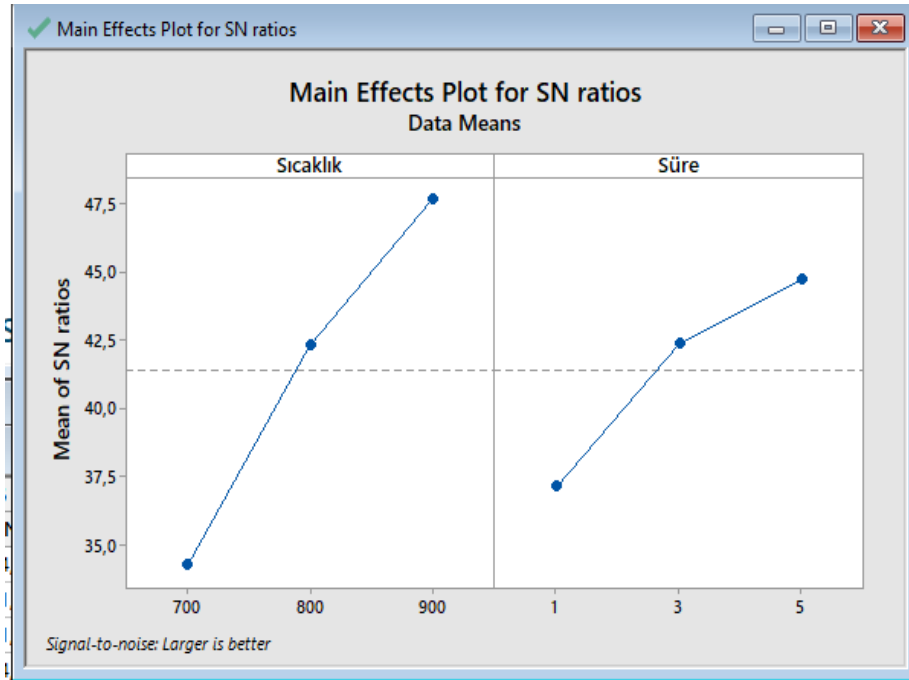
Level	Sıcaklık	Süre
1	34,23	37,11
2	42,32	42,37
3	47,66	44,73
Delta	13,43	7,62
Rank	1	2

Response Table for Means

Level	Sıcaklık	Süre
1	54,31	86,72
2	142,62	158,96
3	253,87	205,12
Delta	199,57	118,40
Rank	1	2

Şekil 4.54. Kaplanmış AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı analizi

Aşağıdaki Şekil 4.55.'de Taguchi Deney Tasarımı analizinden kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı için S/G (sinyal gürültü oranı) hesaplanmıştır.



Şekil 4.55. Kaplanmış AISI M2 çeliği faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri

Kaplanmış AISI M2 çeliği için kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımı modelinde, Şekil 4.55’de görüldüğü gibi sıcaklığın 800°C’de ve 900°C’ de ortalamanın üzerinde olmasından ötürü uygundur. 900°C’ de daha yüksek çıktığı için en iyi sonuç değeridir. 700°C ortalamanın altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak 3 saat ve 5 saat kabul edilebilir değerlerdir. Süre 1 saat çizginin altında kaldığı için uygun değildir. Bu deney için 5 saat en uygun süredir. Kaplanmış AISI M2 çeliği için yapılan deneyde kaplama kalınlığı sonuçlarına göre sıcaklık 900°C de en iyi sonucu verir. Süre olarakda 5 saat en iyi sonuç veren değerdir. Aşağıda Şekil 4.56.’da varyans analizinin sonucu yer almaktadır.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre; ... ma kalınlığı (M2)

The following terms cannot be estimated and were removed:
Kaplama kalınlığı (M2)

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	274,339	137,169	281,86	0,000
Süre	2	91,336	45,668	93,84	0,000
Error	4	1,947	0,487		
Total	8	367,622			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,697613	99,47%	98,94%	97,32%

Şekil 4.56. Kaplanmış AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Şekil 4.56.’da kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı deney sonuçlarına Anova testi uygulanmıştır. R kare değeri %99,47 çıkmıştır. Bu sonuç bakılarak kurulan modelin başarılıdır. ‘P’ değeri 0,005’in altında başarılıdır. ‘P’ değeri sıcaklık için 0,000 hesaplanmıştır. Süre ‘P’ değeri 0,000 hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık süre eşit düzeyde en doğru değeri veren değişkenlerdir.

F değeri sıcaklık için 281,86 hesaplanmıştır. Süre için ‘F’ değeri 93,84 çıkmıştır. Bunun anlamı ‘F’ değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre

olduğudur. Bu deneye göre sıcaklık birinci derecede önemli parametredir, süre ise ikinci derecede önemli parametredir.

4.8. Kırılma Tokluğu İçin Sinyal/Gürültü Oranı Hesaplanması

Tablo 4.10’da yer alan kaplanmış üç çelik türü için kırılma tokluğu deney sonuçları baz alınarak yapılan Taguchi deney tasarımında, kırılma tokluğuna etki eden faktörlerin önem sırası “sıcaklık-süre” şeklinde olduğu görülmektedir. Bunun anlamı kırılma tokluğunu istediğimiz herhangi bir değere çekmek için, sıcaklık faktörü üzerinde değişimler yapmamız gerekir. En kalın tabaka kaplanmış AISI M2 çeliğinde en yüksek sıcaklık ve sürede elde edilmiştir.

Tablo 4.10. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin kırılma tokluk değişim değerleri

Kırılma Tokluğu									
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	0,92	1,2	1,54	1,31	1,6	1,98	1,9	1,9	2,15
AISI D2	0,70	1,5	2,15	1,2	2,01	2,77	2,12	2,12	2,87
AISI M2	1,26	1,5	1,9	1,65	2,06	2,58	3,3	3,3	3,95

4.9. Kaplanmış AISI 4140 Çeliği Kırılma Tokluğu Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli

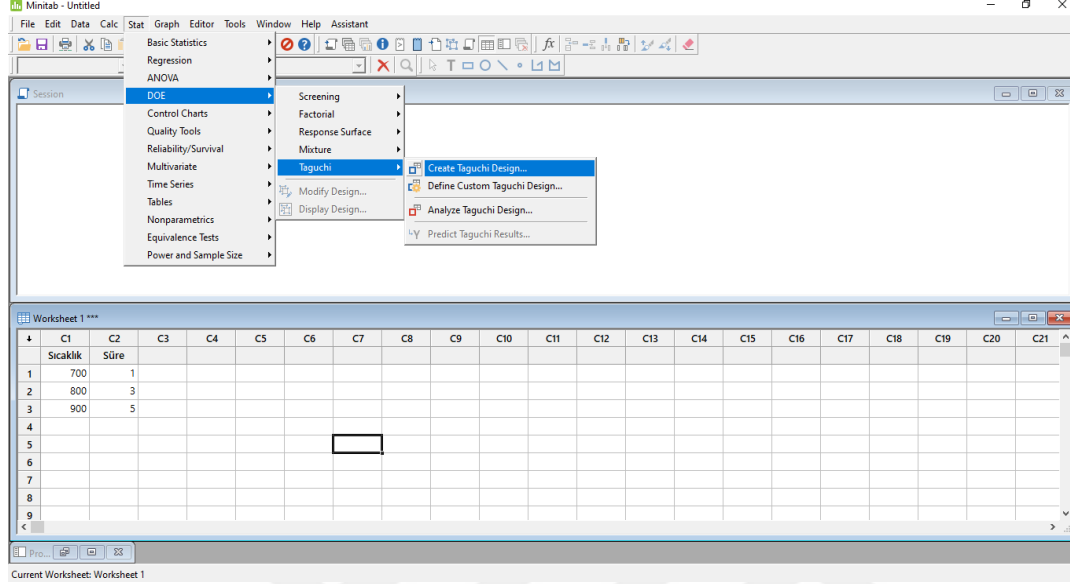
Tablo 4.11. 700 °C, 800°C ve 900 °C’de 1, 3 ve 5 saat süreyle kaplanan AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kırılma tokluğu değişimler

Kırılma Tokluğu									
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	0,92	1,2	1,54	1,31	1,6	1,98	1,9	1,9	2,15

Minitab Programında Analiz İçin İşlem Adımları

1.Adım

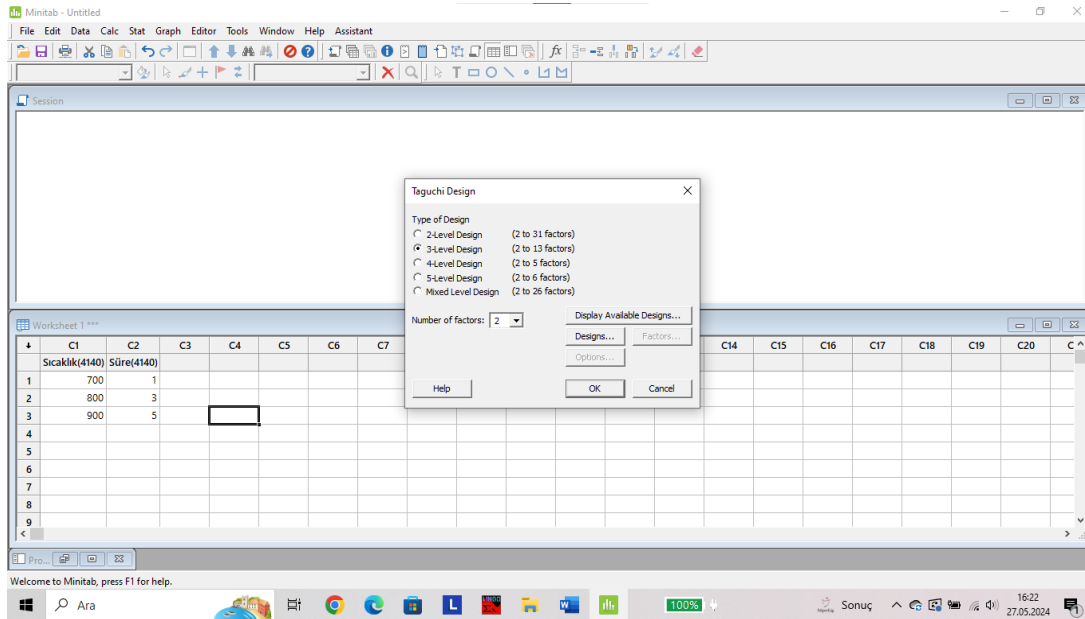
DOE - TAGUCHI-CREATE TAGUCHI – DESIGN Şekil 4.57.'de sırasıyla seçilir.



Şekil 4.57. Program arayüzü

2.Adım

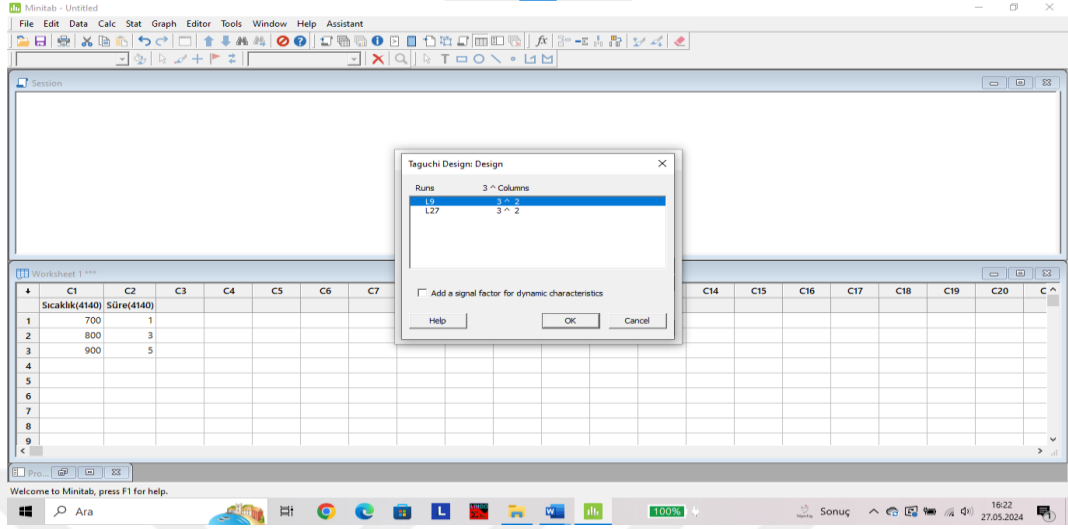
Şekil 4.58.'de modelin level sayısı belirlenir. Modelimiz 3 sütuna sahip olduğu için level 3 seçilir. 2 parametremiz olduğundan dolayı faktör sayısı 2 seçilir.



Şekil 4.58. Faktörlerin programa tanıtımı

3. Adım

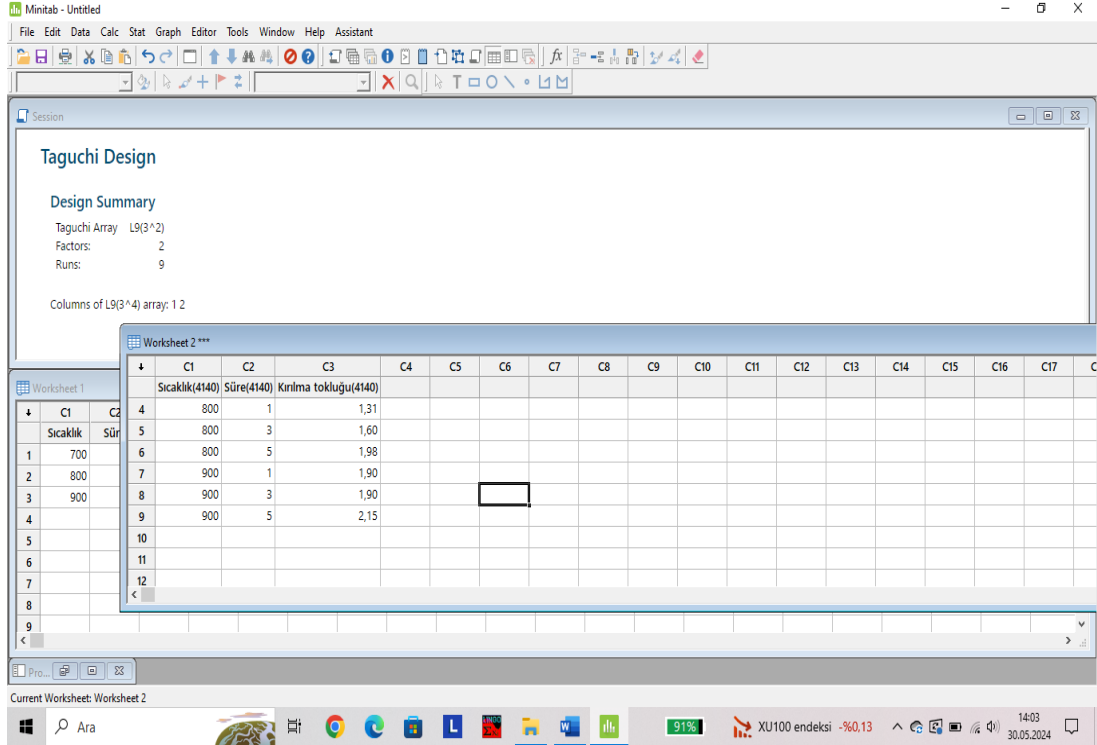
Şekil 4.59’da dokuz farklı deney için sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 4.59. Taguchi deney tasarımı deney sayısı tayini

4. Adım

Şekil 4.60.’da deney parametrelerine göre sonuçların ne olacağı hesaplanır.Örneğin 700 derecede, 1 saat süre ile kaplama kalınlığı değeri hesabı.



Şekil 4.60. Program arayüzü

5. Adım

Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçları Şekil 4.61’de girilir. Sonuç değerlerini kullanmak için ‘Analyze Taguchi Design’ kullanılır.

The screenshot shows the Minitab Taguchi Design window. The Design Summary indicates a Taguchi Array of $L_9(3^2)$ with 2 factors and 9 runs. The columns of the $L_9(3^4)$ array are 1 and 2. The worksheet below shows the data for the experiment.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
4	Sıcaklık(4140)	Süre(4140)	Kırılma tokluğu(4140)														
5	800	1	1,31														
6	800	3	1,60														
7	800	5	1,98														
8	900	1	1,90														
9	900	3	1,90														
10	900	5	2,15														
11																	
12																	

Şekil 4.61. Taguchi test üretimlerinin proses sonuç değerleri.

6. Adım

Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçları Şekil 4.62.’de kullanılır.

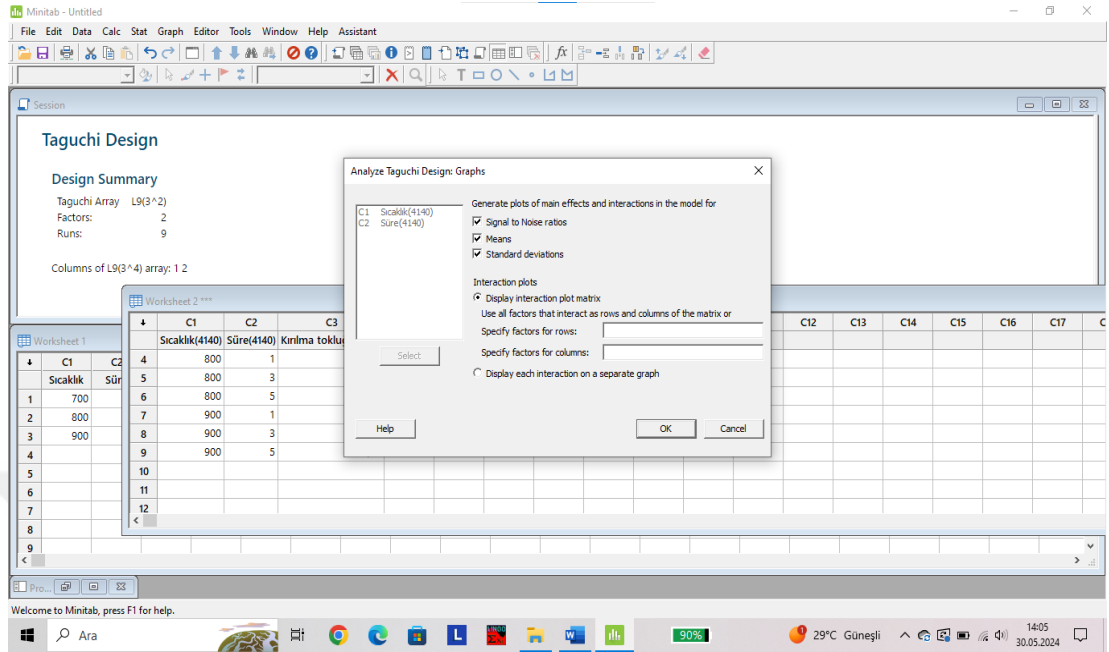
The screenshot shows the Minitab Taguchi Design window with the 'Analyze Taguchi Design' dialog box open. The dialog box has 'C3 Kırılma tokluğu(4140)' selected in the 'Response data are in:' field. The worksheet below shows the data for the experiment.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
4	Sıcaklık(4140)	Süre(4140)	Kırılma tokluğu(4140)														
5	800	1	1,31														
6	800	3	1,60														
7	800	5	1,98														
8	900	1	1,90														
9	900	3	1,90														
10	900	5	2,15														
11																	
12																	

Şekil 4.62. Minitab programı kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu Taguchi deney tasarım arayüzü.

7. Adım

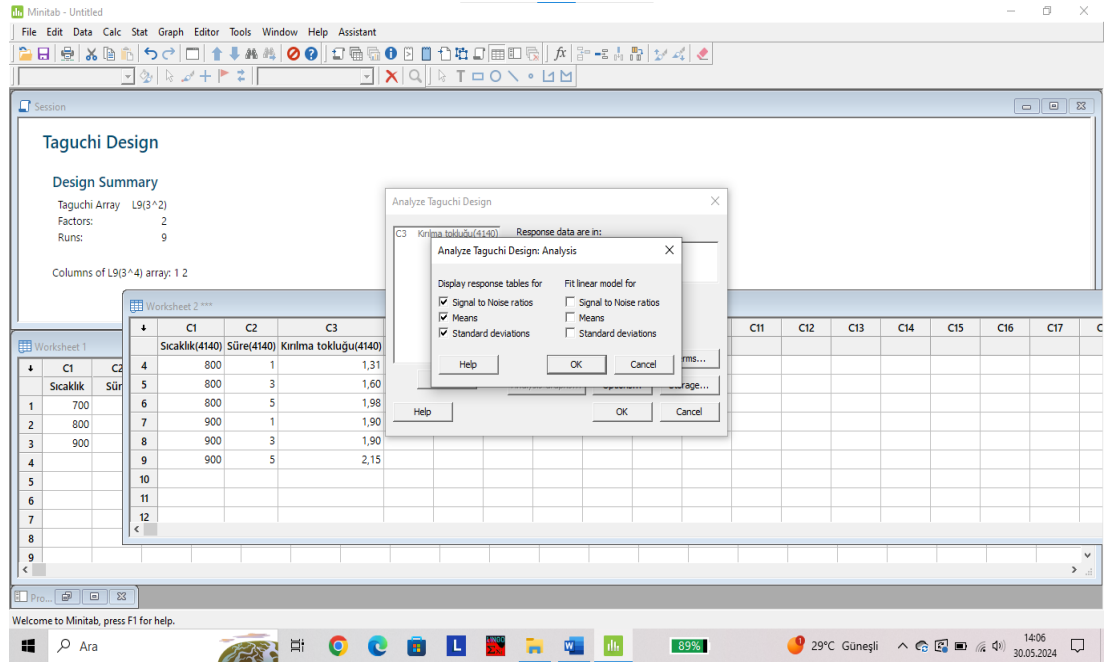
Performans ölçümünü için Şekil 4.63.'de seçilir.



Şekil 4.63. Minitab programı Taguchi deney tasarım arayüzü

8. Adım

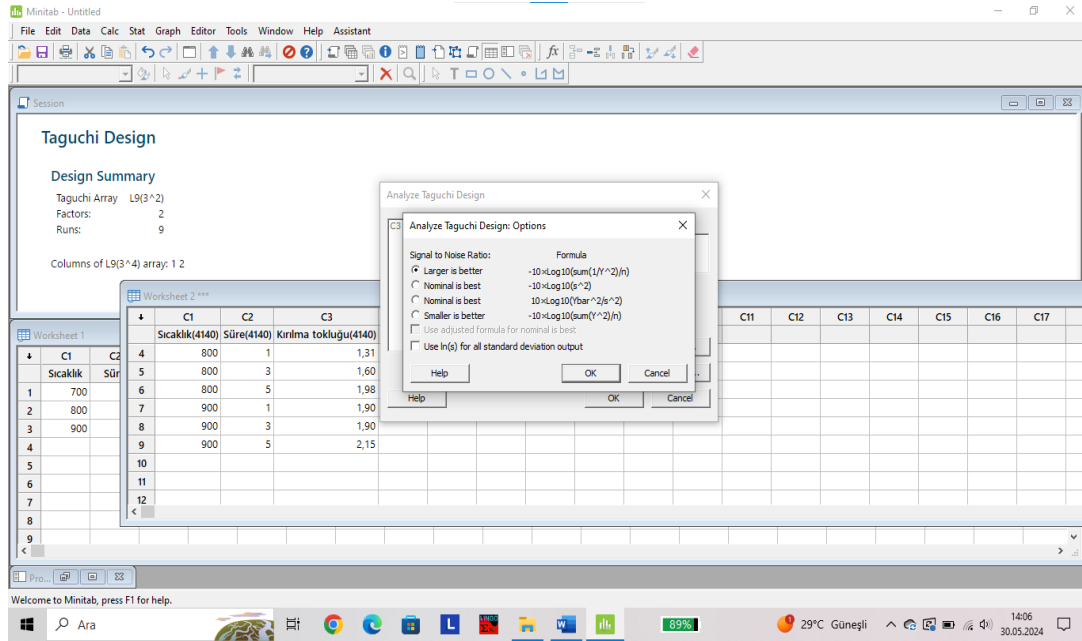
Şekil 4.64.'de ilgili kutular seçilir.



Şekil 4.64. Taguchi deney tasarım arayüzü

9.Adım

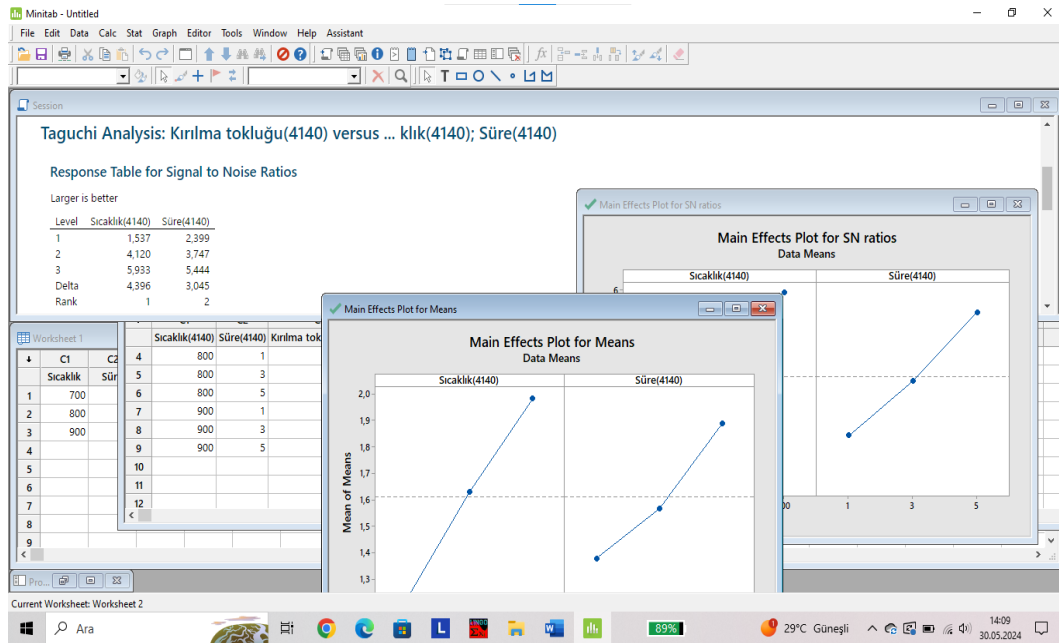
Şekil 4.65.'de 'Larger is better' seçilir.



Şekil 4.65. Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

10. Adım

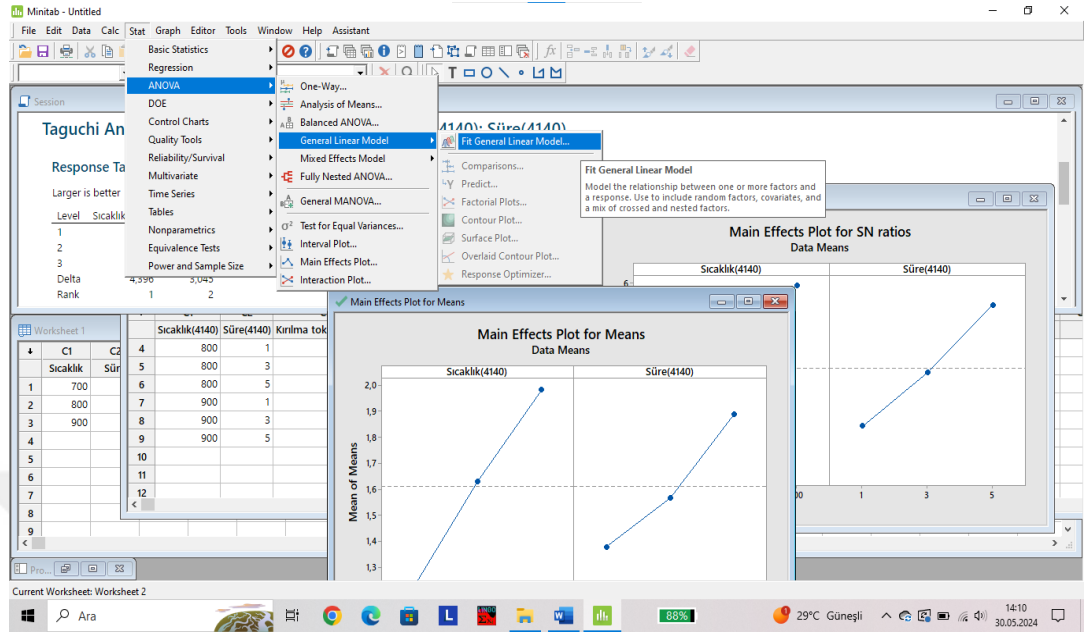
Şekil 4.66.'da, kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği ve sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 4.66. Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği

11. Adım

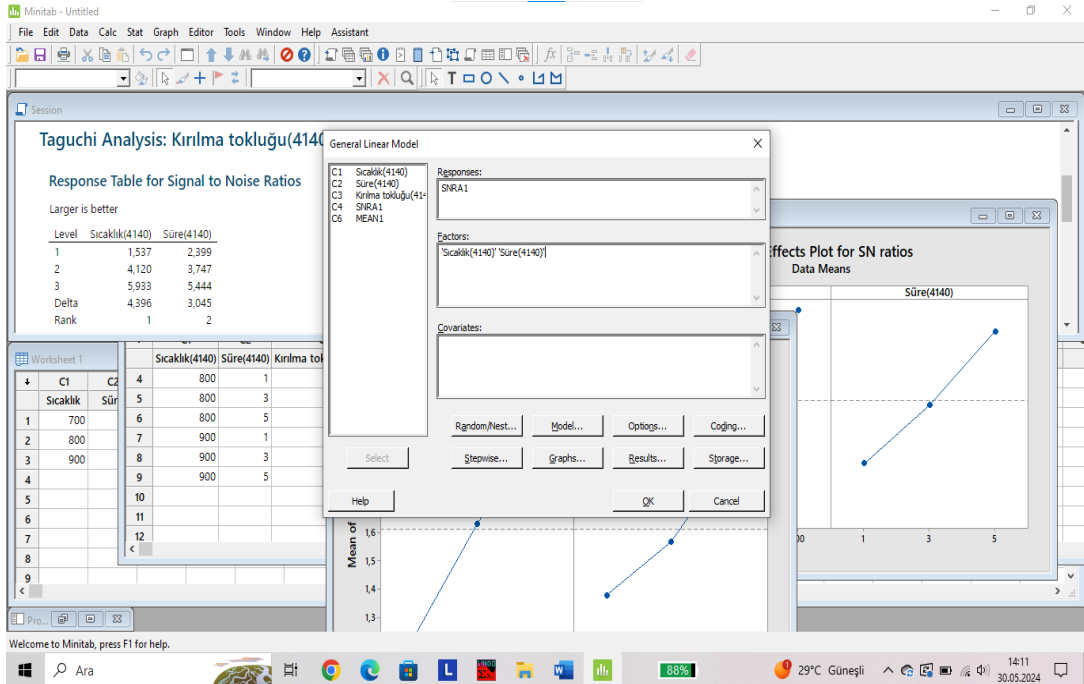
Kaliteyi ölçmek için ANOVA testi Şekil 4.67’de uygulanır.



Şekil 4.67. Minitap programı kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu Anava testi hesaplama arayüzü

12. Adım

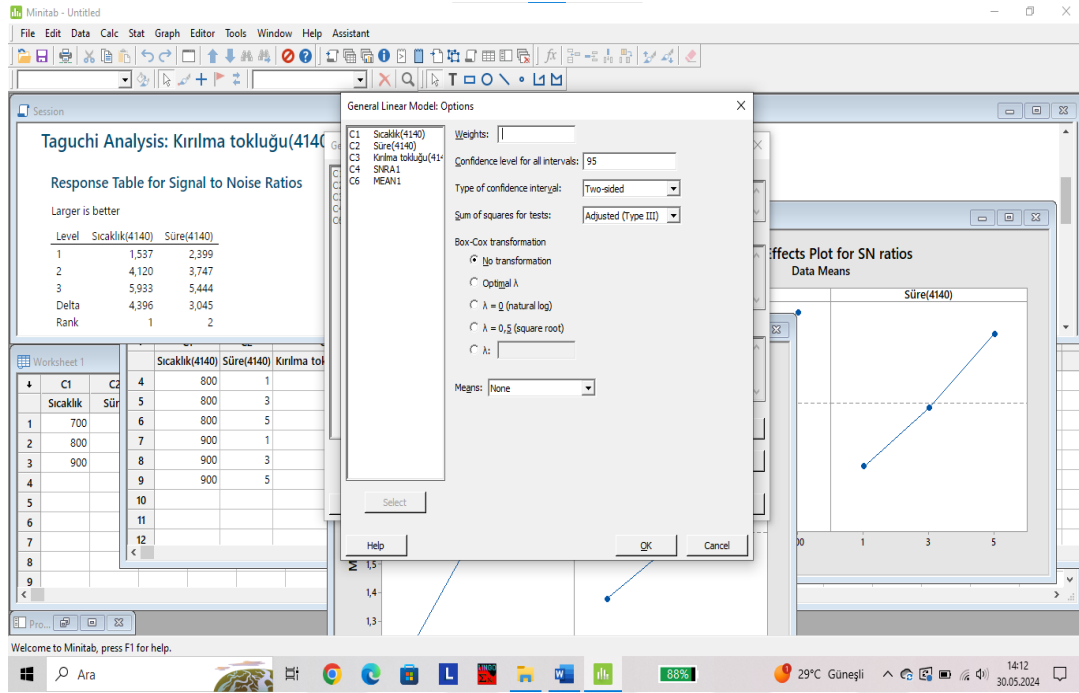
Şekil 4.68.’de, iki değişken olan sıcaklık ve süre ‘factors’ kutusuna tanıtılır.



Şekil 4.68. Anova testi güven düzeyi analizi

13. Adım

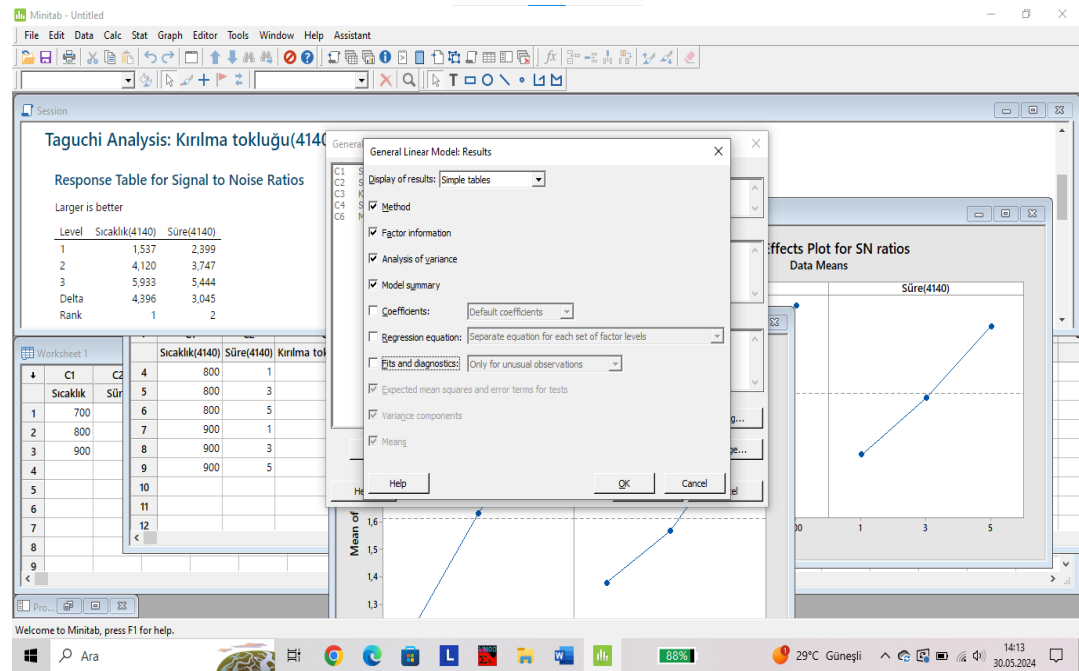
Şekil 4.69.'da, %95 güven aralığında analiz yapılır.



Şekil 4.69. Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu F, P testi ve model analiz sonuçları

14.Adım.

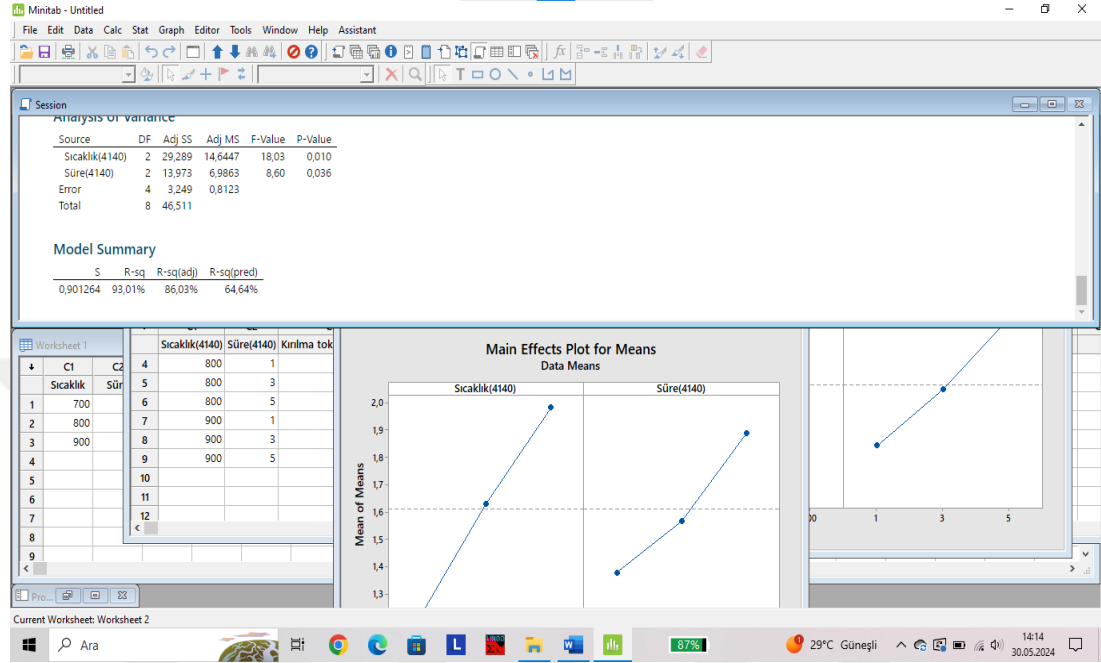
Şekil 4.70.'de, sonuç kısmında istenilen tablolar seçilir. 'Model summary' yeterlidir.



Şekil 4.70. Model summary analiz sonuçları

15.Adım.

Şekil 4.71. ve 4.72’de görüldüğü gibi modelin sonucu belirlenir R-kare değeri modelin anlamlılığını açıklar ve bu değer %93,01 olarak hesaplanmıştır. Modelin başarılı olduğu anlamına gelir.



Şekil 4.71. R kare değeri ve modelin anlamlılık seviyesi

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3²)
Factors: 2
Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3²)
Factors: 2
Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2

Taguchi Analysis: Kırılma tokluğu (4140) versus Sıcaklık; Süre

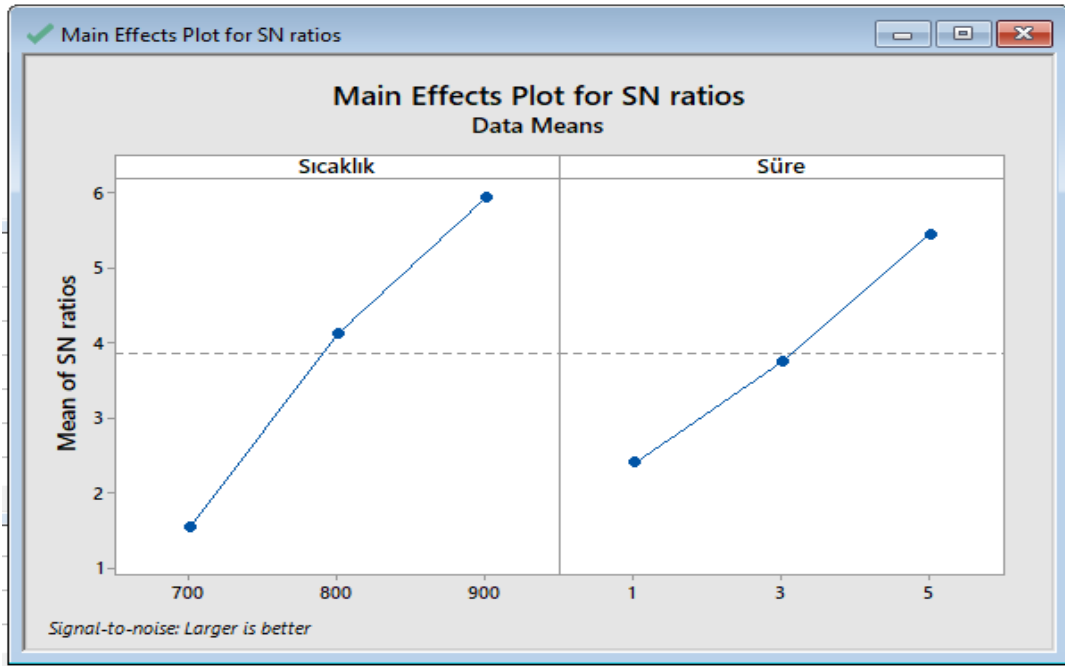
Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

Level	Sıcaklık	Süre
1	1,537	2,399
2	4,120	3,747
3	5,933	5,444
Delta	4,396	3,045

Şekil 4.72. Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu Taguchi deney tasarımı analizi

AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu için yapılan Taguchi deney tasarımı modelinde, Şekil 5.73.'de görüldüğü üzere, sıcaklık 800°C ortalamanın üstünde çıktığı için uygundur. Aynı şekilde 900°C' de ortalamanın üstünde çıktığı için uygundur. 900°C' de daha yüksek çıktığı için en iyi sonucu verir. 700°C ortalamanın altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak 5 saat kabul edilebilir değerdir. Süre 1 saat ve 3 saat çizginin altında kaldığı için uygun değildir. Bu deney için 5 saat en uygun süredir. Yani kaplanmış AISI 4140 çeliği için yapılan deneyde, kırılma tokluğu sonuçlarına göre 900°C sıcaklıkta uygundur.



Şekil 4.73. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için faktörlerin kırılma tokluğu üzerindeki seviyeleri

Şekil 4.74.'de kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır. R kare değeri %93,01 çıkmıştır. 'P' değeri 0,005'in altında başarılıdır. 'P' değeri sıcaklık için 0,010 hesaplanmıştır. Süre için 0,036 olarak hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık ve süre 0,005'in üstünde çıktığı için anlamlı değildir.

F değerine bakıldığında sıcaklık için 18,03 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 8,60 çıkmıştır. Bunun anlamı 'F' değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre sıcaklık birinci derecede önemli parametredir, süre ise ikinci derecede önemli parametredir.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	29,289	14,6447	18,03	0,010
Süre	2	13,973	6,9863	8,60	0,036
Error	4	3,249	0,8123		
Total	8	46,511			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,901264	93,01%	86,03%	64,64%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3,863	0,300	12,86	0,000	
Sıcaklık					
700	-2,327	0,425	-5,48	0,005	1,33
800	0,257	0,425	0,61	0,578	1,33
Süre					
1	-1,465	0,425	-3,45	0,026	1,33
3	-0,116	0,425	-0,27	0,798	1,33

Şekil 4.74. 700 °C, 800°C ve 900 °C’de 1, 3 ve 5 saat süreyle kaplanan AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kırılma tokluğu Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

4.10. Kaplanmış AISI D2 Çeliği Kırılma Tokluğu Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli

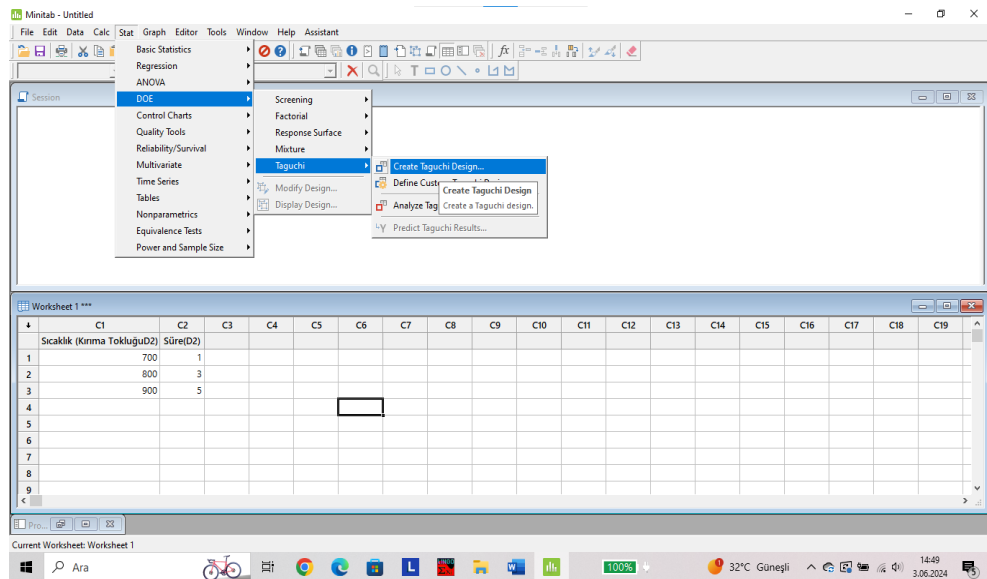
Tablo 4.12. Kaplanmış AISI D2 çeliği kırılma tokluğu değişim değerleri

Sıcaklık (°C)	Kırılma Tokluğu								
	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI D2	0,70	1,5	2,15	1,2	2,01	2,77	2,12	2,12	2,87

Minitab Programında Analiz İçin İşlem Adımları

1.Adım

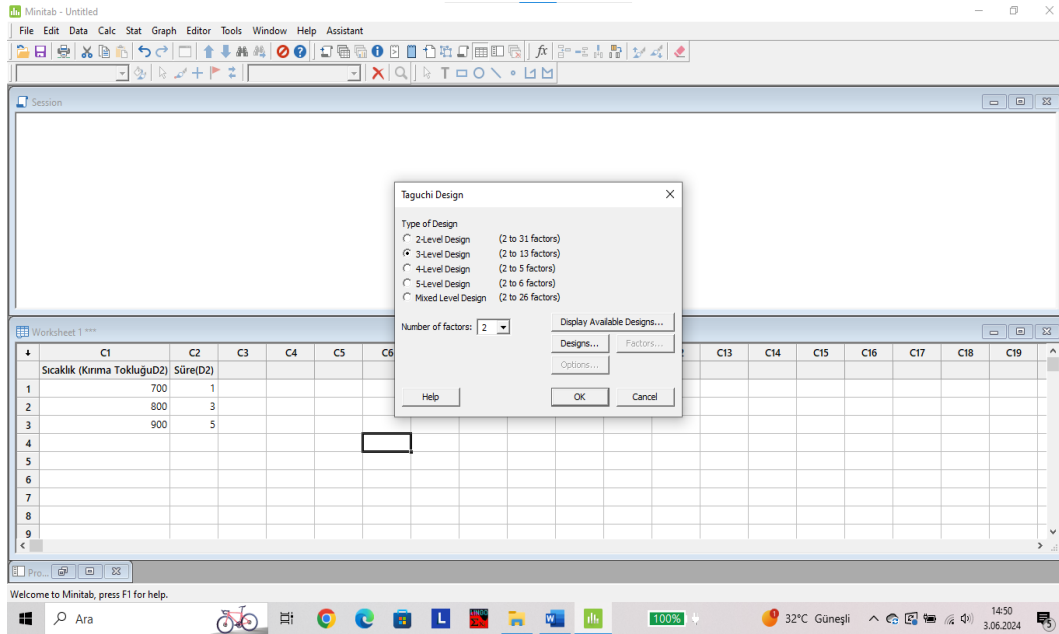
Şekil 4.75.’de sırasıyla DOE - TAGUCHI-CREATE TAGUCHI – DESIGN tıklanır.



Şekil 4.75. Tasarım arayüzü

2.Adım

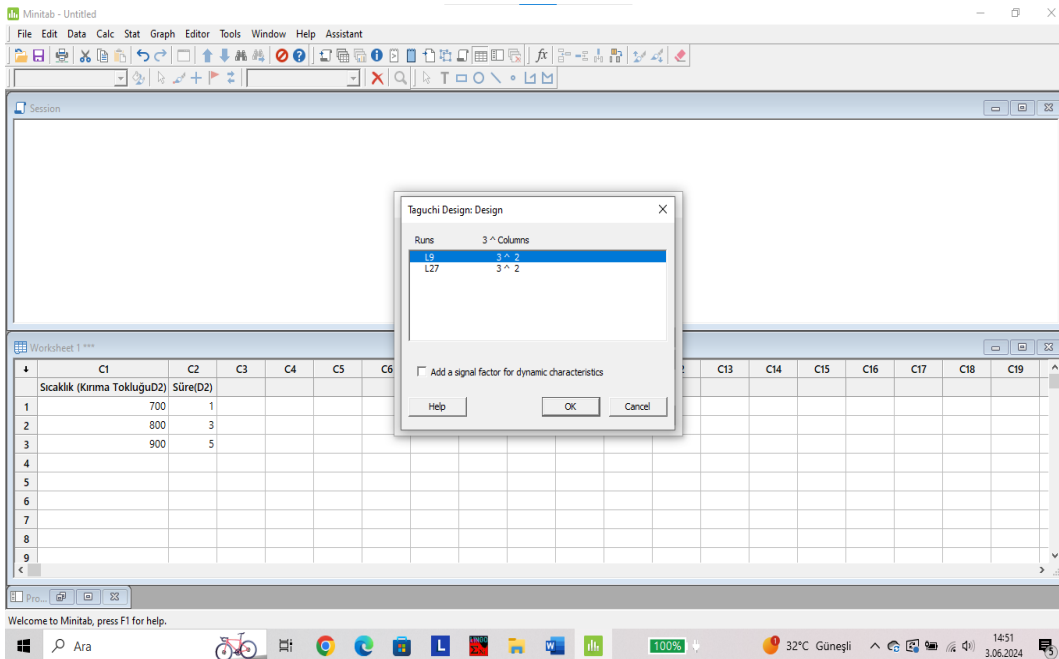
Şekil 4.76.'da modelin level sayısı belirlenir. Level 3 seçilir, faktör sayısı 2 seçilir.



Şekil 4.76. Faktörlerin programa tanımlanması

3. Adım

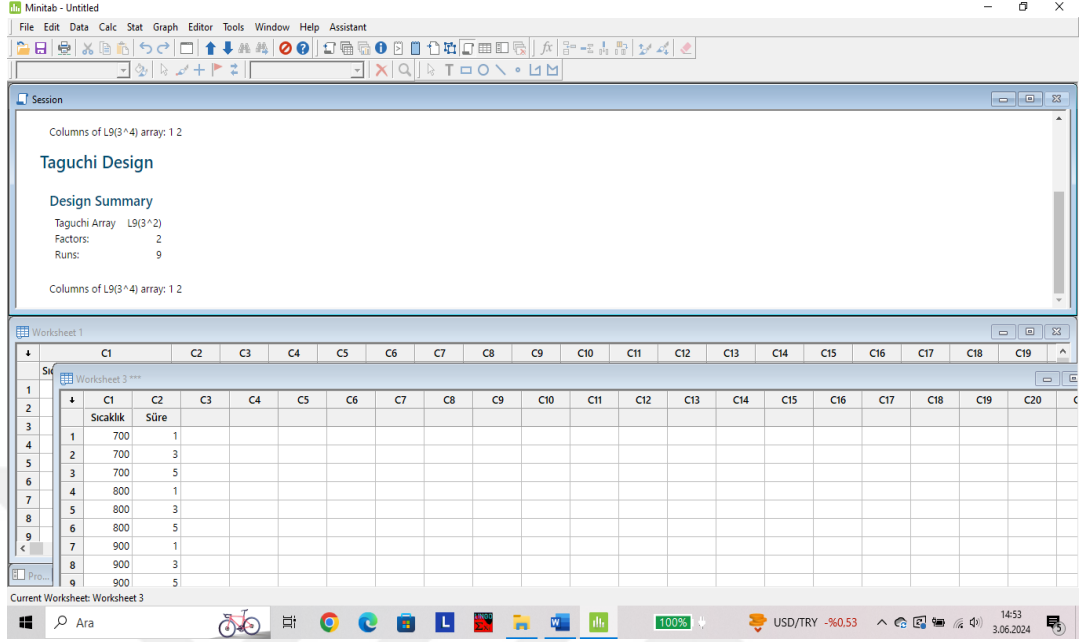
Şekil 4.77.'de görüldüğü üzere $L_9 3^2$ seçilerek dokuz farklı deney yapılır.



Şekil 4.77. Taguchi deney tasarımı deney sayısı arayüzü

4. Adım

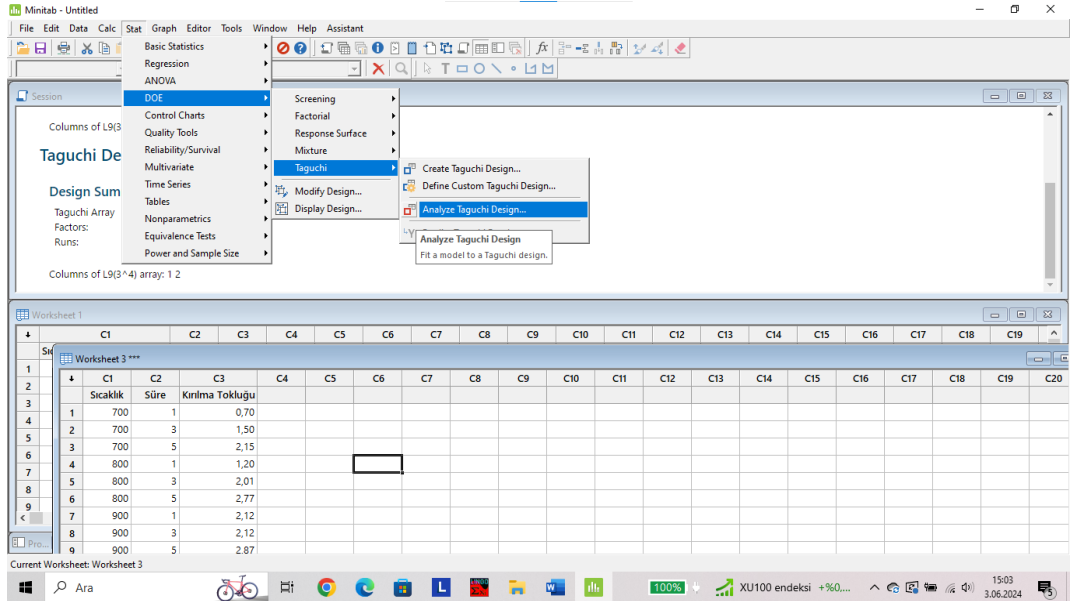
Şekil 4.78.'de deney parametrelerine göre sonuçların ne olacağı hesaplanır.



Şekil 4.78. Minitab programı taguchi deney tasarımı sonuç hesaplama arayüzü.

5. Adım

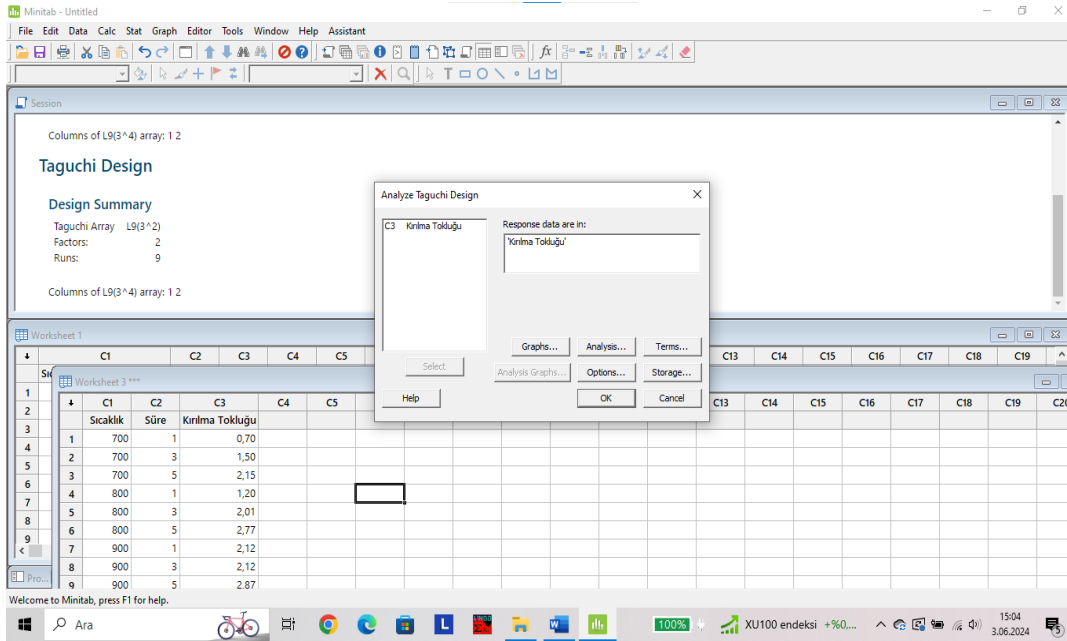
Kaplanmış AISI D2 çeliği için kırılma tokluğu deney sonuçları Şekil 4.79.'da girilir. Sonuç değerlerimizi kullanmak için 'Analyze Taguchi Design' ile sonuç değerlerimizin girişi yapılır.



Şekil 4.79. Kaplanmış AISI D2 çeliği için kırılma tokluğu Taguchi test üretimlerinin proses çıktı değerleri

6. Adım

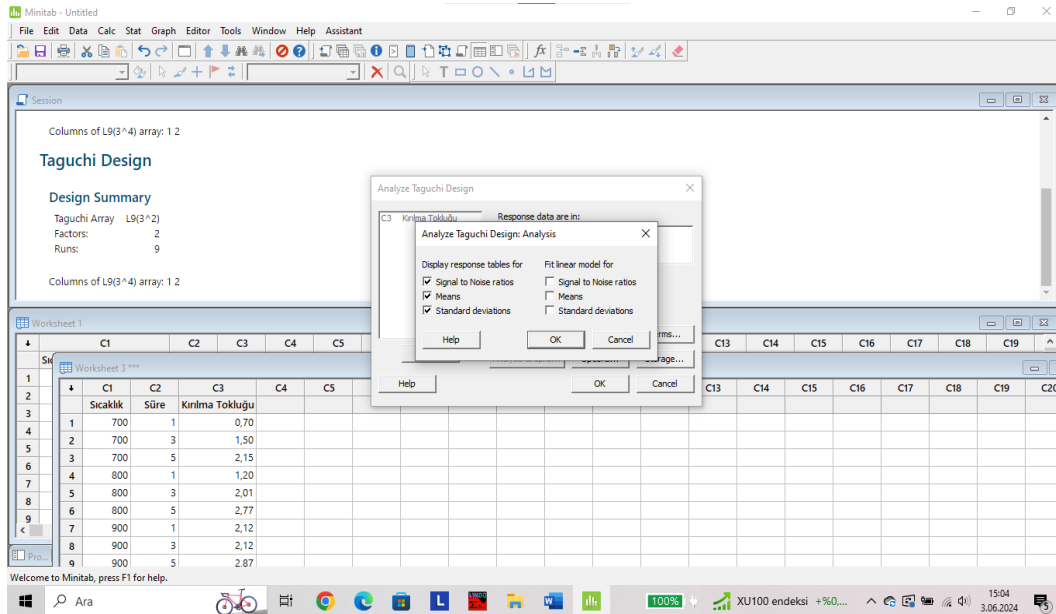
Kırılma tokluğu deney sonuçlarını kullanmak için kutuya ismi Şekil 4.80.'de tanıtılır.



Şekil 4.80. Minitab programı kırılma tokluğu Taguchi deney tasarım arayüzü

7. Adım

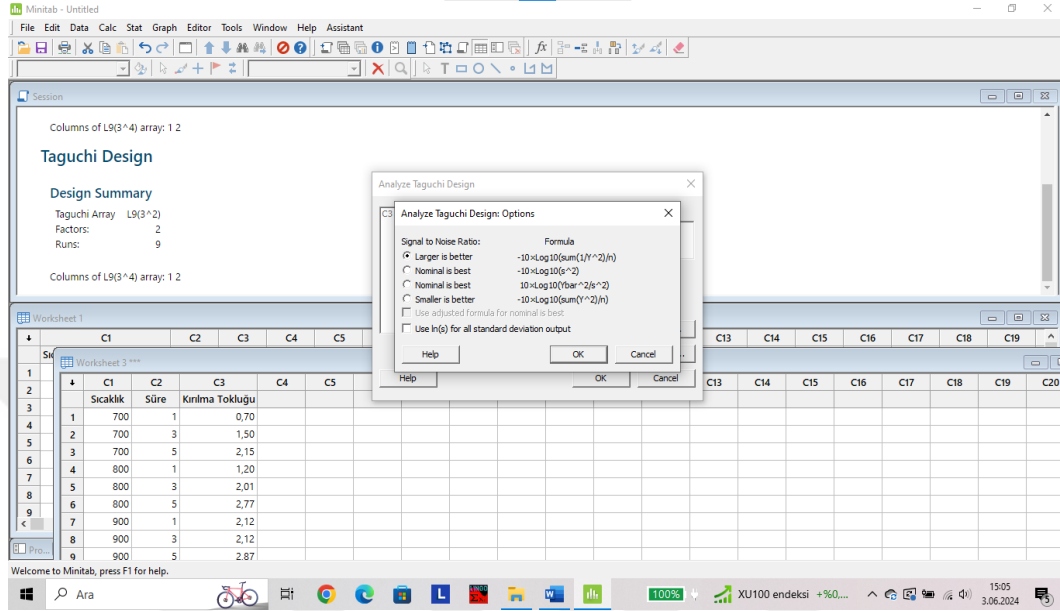
Performansı belirlemek için Şekil 4.81. seçilir.



Şekil 4.81. Taguchi deney tasarımı sinyal-gürültü arayüzü

8.Adım

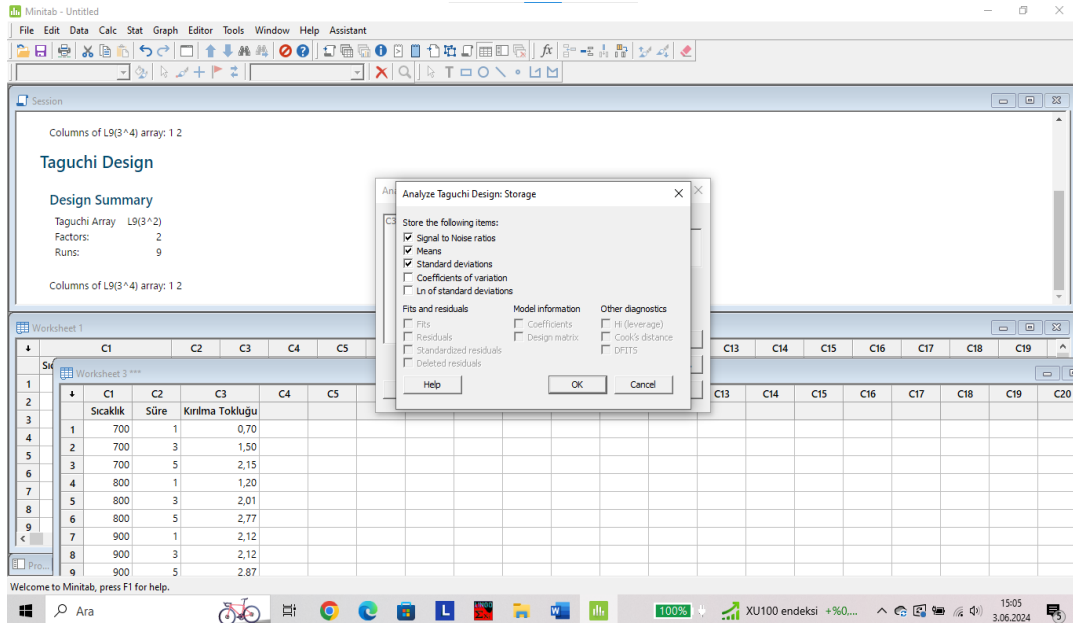
Sinyal gürültü değeri karşılaştırması Şekil 4.82’de yapılır. ‘Larger is better’ seçilir. Sonuç performans değişkeninde en yüksek skor, en iyi kalitede olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.82. Kaplanmış AISI D2 çeliği için kırılma tokluğu sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

9. Adım

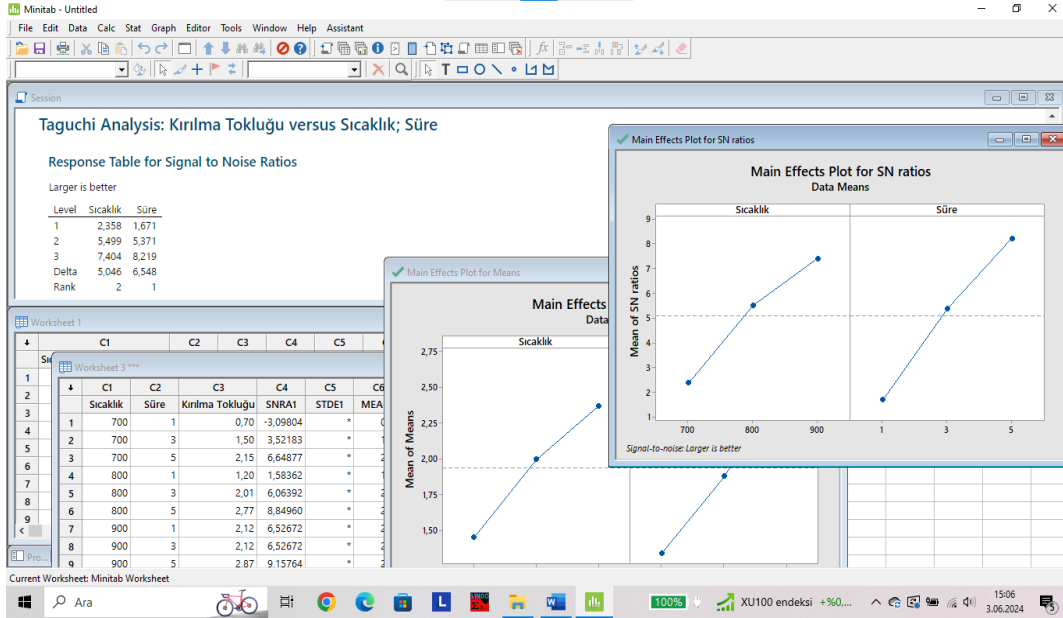
Stroke kısmında kutular Şekil 4.83.’de seçilir



Şekil 4.83. Sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

10. Adım

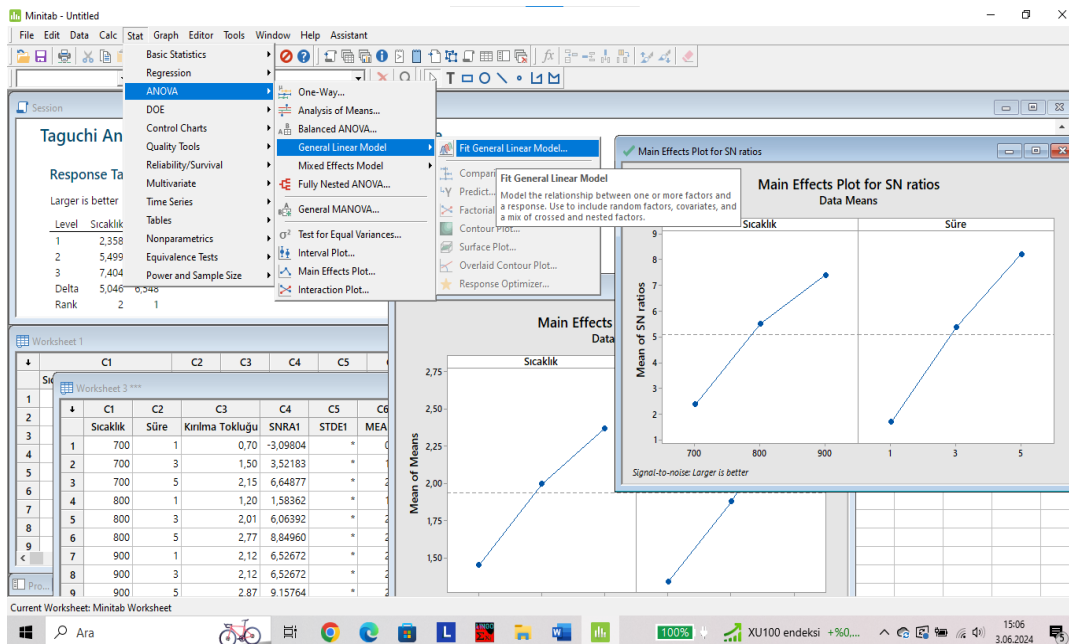
Şekil 4.84.'de sinyal gürültü oranı grafiği, sıcaklık ve süre sonuç değerleri bulunmaktadır.



Şekil 4.84. Kaplanmış AISI D2 çeliği için kırılma tokluğu sıcaklık ve süre için sinyal gürültü oranı grafiği

11. Adım

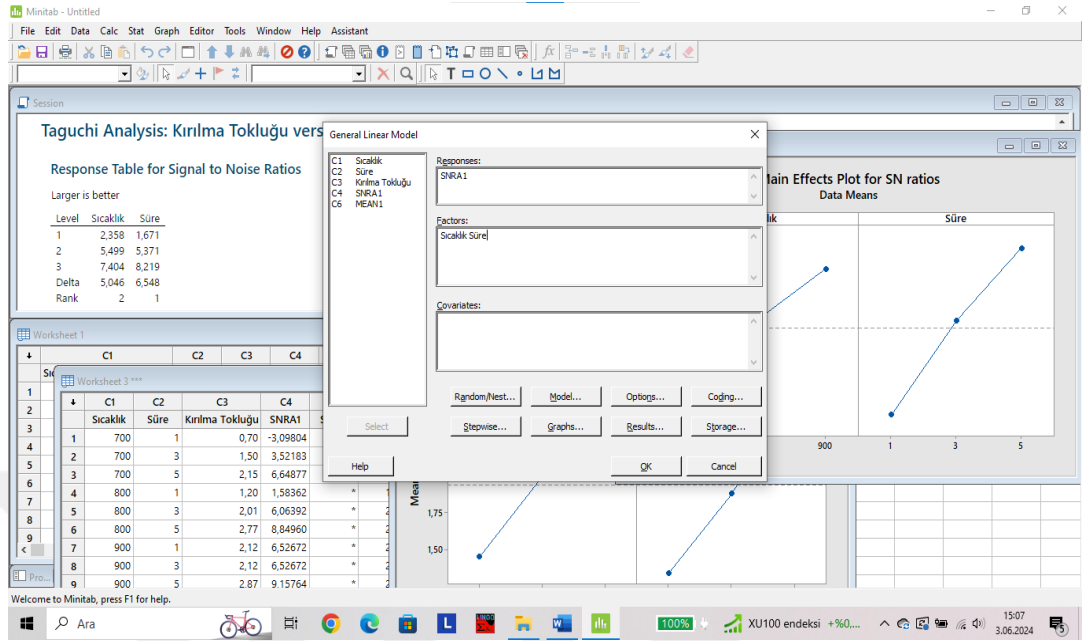
Şekil 4.85.'de kalite ölçümü için ANOVA testi uygulanır.



Şekil 4.85. Minitap programı Anava testi hesaplama arayüzü

12. Adım

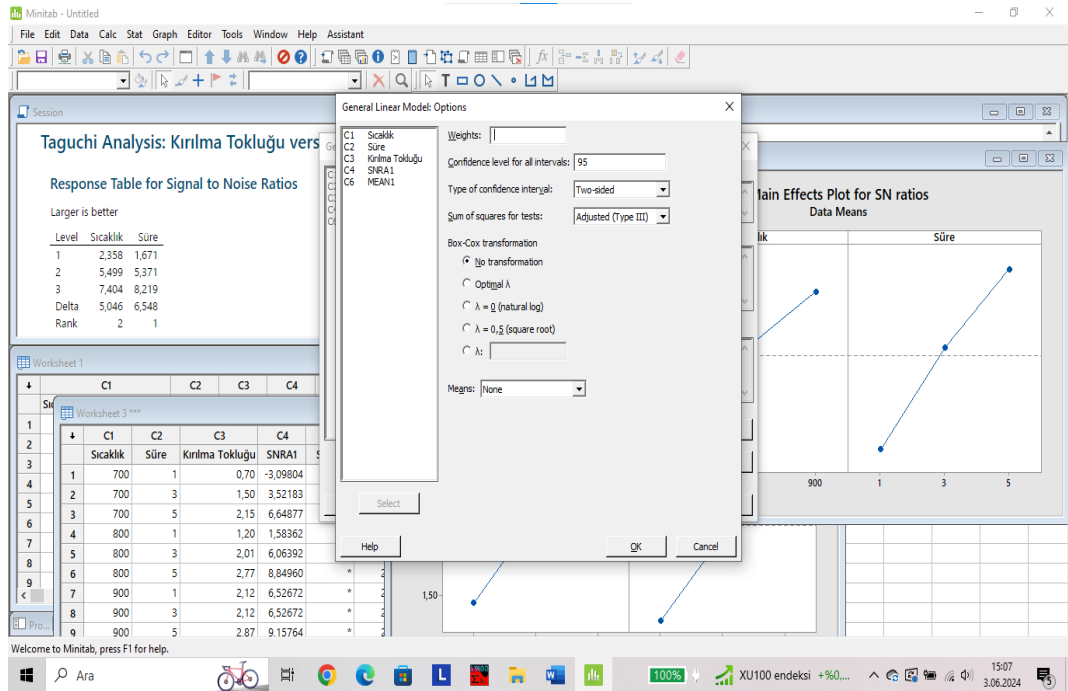
Sıcaklık ve süre ‘factors’ kutusuna Şekil 4.86.’da eklenir.



Şekil 4.86. Anova testi güven düzeyi analizi

13. Adım

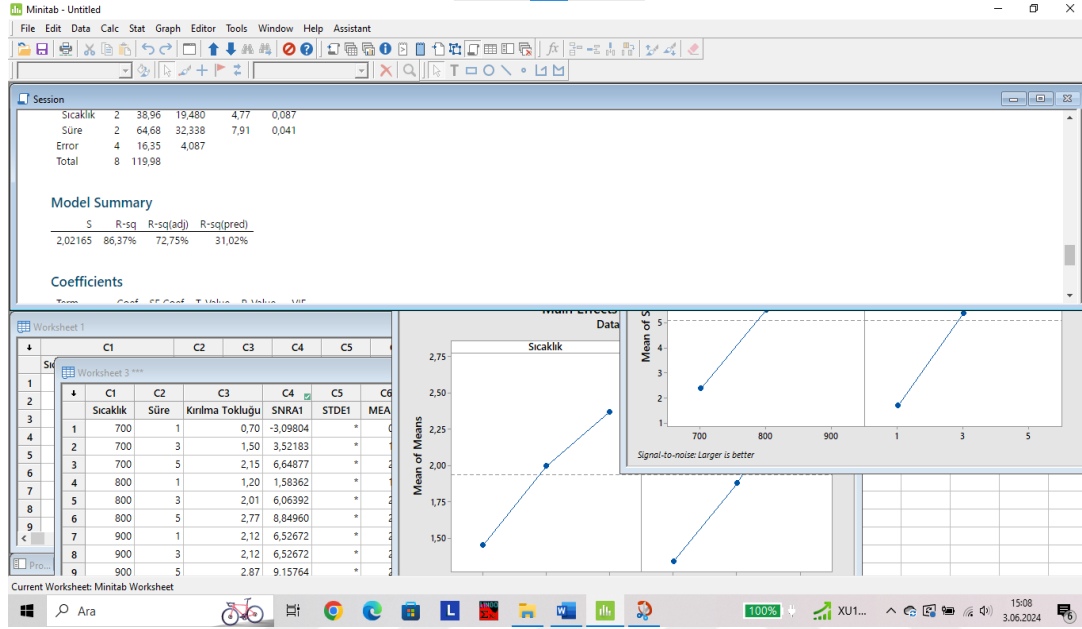
%95 güven aralığında analiz Şekil 4.87.’de yapılır.



Şekil 4.87. Kaplanmış AISI D2 çeliği için kırılma tokluğu F, P testi ve model analiz sonuçları

14.Adım.

Sonuç kısmında görmek istenilen tablolar Şekil 4.88.’de seçilir. ‘Model summary’ yeterlidir. Şekil 4.89’da kaplanmış AISI D2 çeliği için kırılma tokluğu Taguchi deney tasarımı analizi görülmektedir.



Şekil 4.88. Model summary seçimi

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3²)
Factors: 2
Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2

Taguchi Analysis: Kırılma tokluğu (D2) versus Sıcaklık; Süre

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

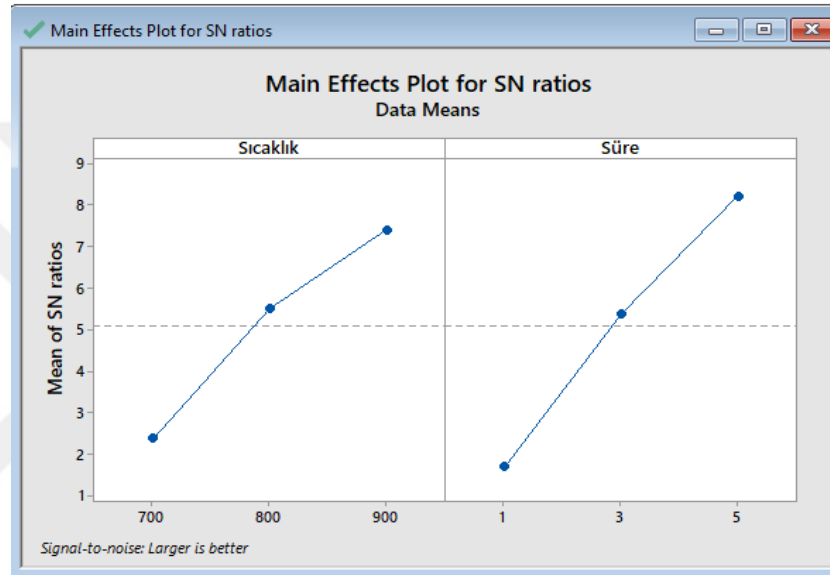
Level	Sıcaklık	Süre
1	2,358	1,671
2	5,499	5,371
3	7,404	8,219
Delta	5,046	6,548
Rank	2	1

Response Table for Means

Level	Sıcaklık	Süre
1	1,450	1,340
2	1,993	1,877
3	2,370	2,597
Delta	0,920	1,257
Rank	2	1

Şekil 4.89. Kaplanmış AISI D2 çeliği için kırılma tokluğu Taguchi deney tasarımı analizi

Kaplanmış AISI D2 çeliği kırılma tokluğu için yapılan Taguchi deney tasarımı modelinde S/G oranı hesaplanmıştır ve Şekil 4.90.'da görüldüğü gibi sıcaklık 800°C olup ortalamanın üstündedir. Aynı şekilde 900°C de ortalamanın üzerinde çıkmıştır. 700°C ortalamanın altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak, 3 ve 5 saat kabul edilebilir değerlerdir. Bu deney için 5 saat en uygun süredir. Kaplanmış AISI D2 çeliği için yapılan bu deneyde, kırılma tokluğu sonuçlarına göre sıcaklık 900°C'de iyi değerdir. Ayrıca Şekil 4.91.'de varyans analizinin model özeti yer almaktadır.



Şekil 4.90. Kaplanmış AISI D2 çeliği için faktörlerin kırılma tokluğu üzerindeki seviyeleri

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	38,96	19,480	4,77	0,087
Süre	2	64,68	32,338	7,91	0,041
Error	4	16,35	4,087		
Total	8	119,98			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2,02165	86,37%	72,75%	31,02%

Şekil 4.91. Kaplanmış AISI D2 çeliği için kırılma tokluğu Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Şekil 4.90.'da görüldüğü gibi kaplanmış AISI D2 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır. R kare değeri %86,37 çıkmıştır. Bu değere göre model başarılıdır. 'P' değeri 0,005'in altınada başarılıdır. 'P' değeri sıcaklık için 0,087 hesaplanmıştır. Süre için 0,041 olarak hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık ve süre 0,005'in üstünde çıktığı için anlamlı değildir. F değerine bakıldığında sıcaklık için 4,77 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 7,91 çıkmıştır. Bunun anlamı 'F' değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre süre birinci derecede önemli parametredir, sıcaklık ise ikinci derecede önemli parametredir

4.11. Kaplanmış AISI M2 Çeliği Kırılma Tokluğu Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli

Tablo 4.13.'de planlanan L9 ortogonal dizini kombinasyonları testi gerçekleştirilmiştir.

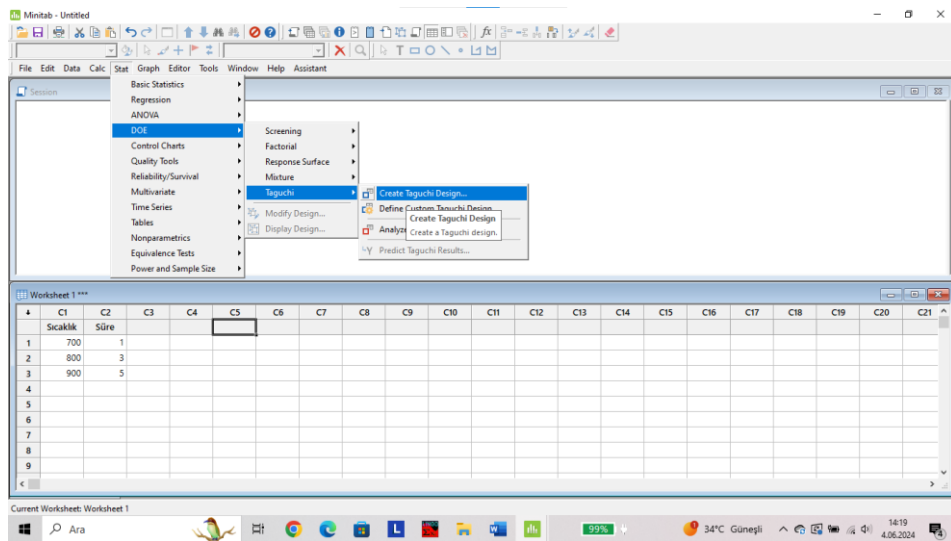
Tablo 4.13. Kaplanmış AISI M2 çeliği için kırılma tokluğu değişimler

Kırılma Tokluğu									
Sıcaklık (°C)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI M2	1,26	1,5	1,9	1,65	2,06	2,58	3,3	3,3	3,95

Minitab Programında Analiz İçin İşlem Adımları

1.Adım

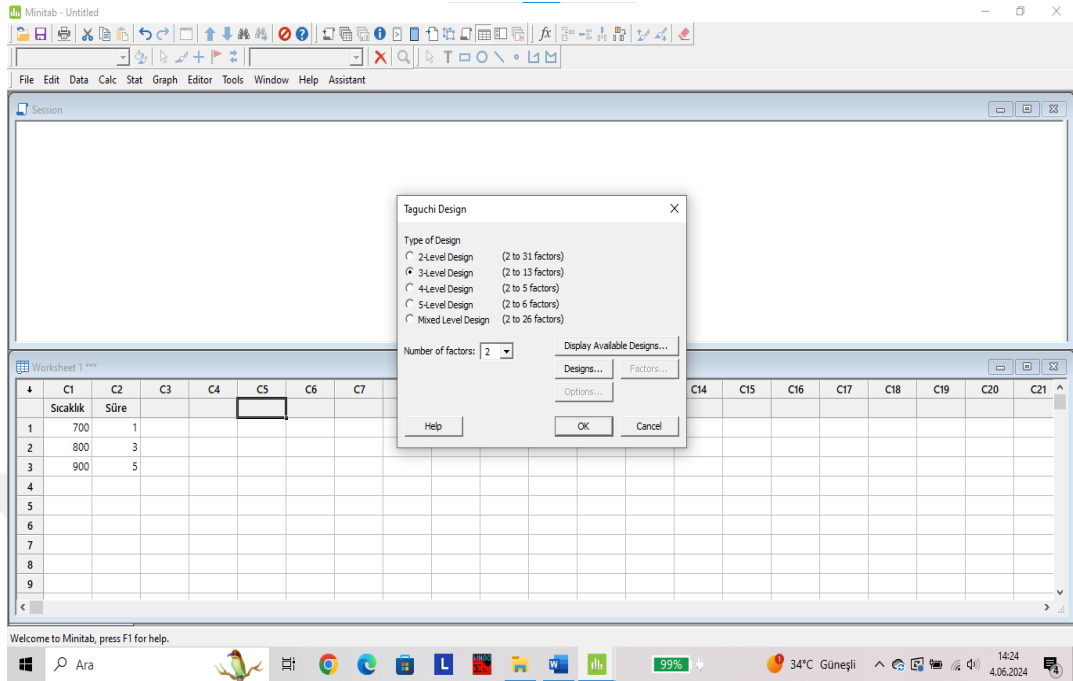
DOE - TAGUCHI-CREATE TAGUCHI – DESIGN Şekil 4.92.'de seçilir.



Şekil 4.92. Tasarım arayüz

2. Adım

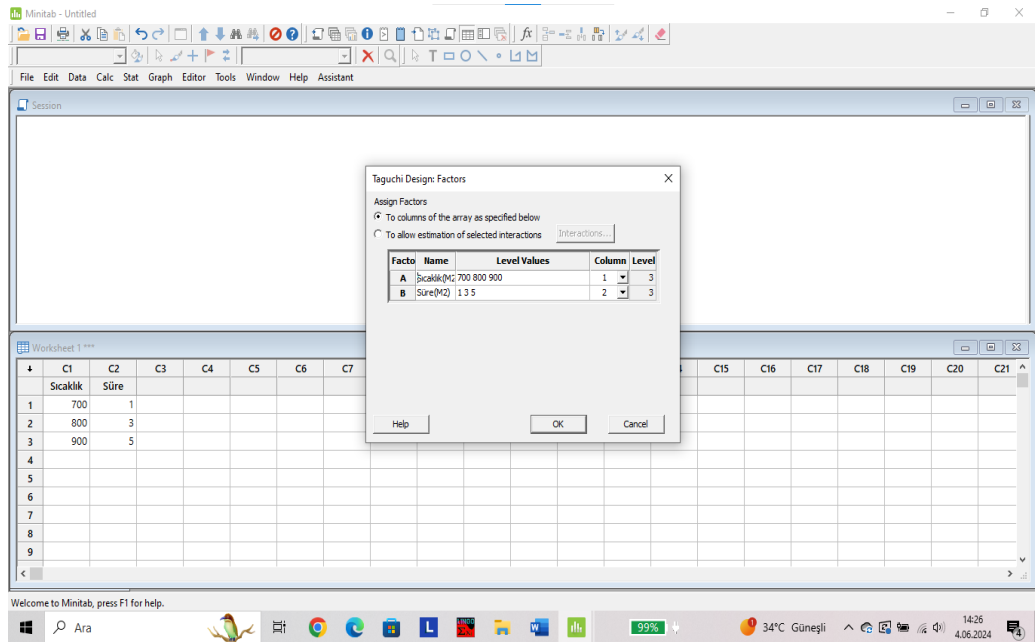
Şekil 4.93.'de modelin level sayısı belirlenir. Level 3, faktör sayısı 2 seçilir.



Şekil 4.93. Faktörlerin programa tanımlanması

3. Adım

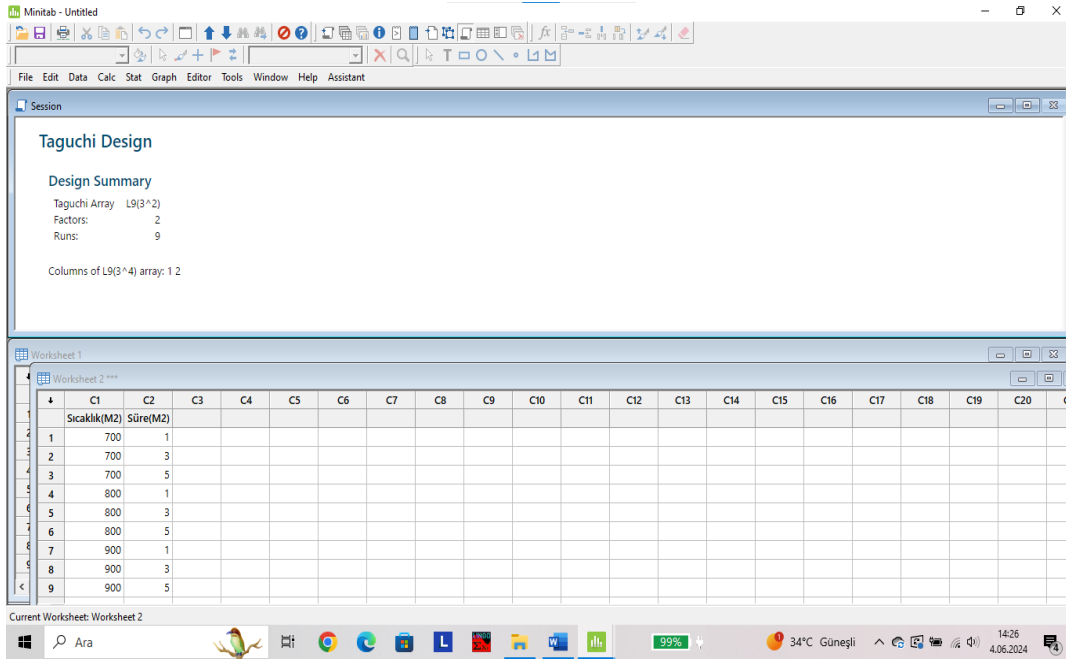
Şekil 4.94.'de dokuz farklı deney ile sonuçlar elde edilir. Faktör dizaynı ekranına parametrelerin girişi yapılır.



Şekil 4.94. Taguchi deney tasarımı deney arayüzü

4. Adım

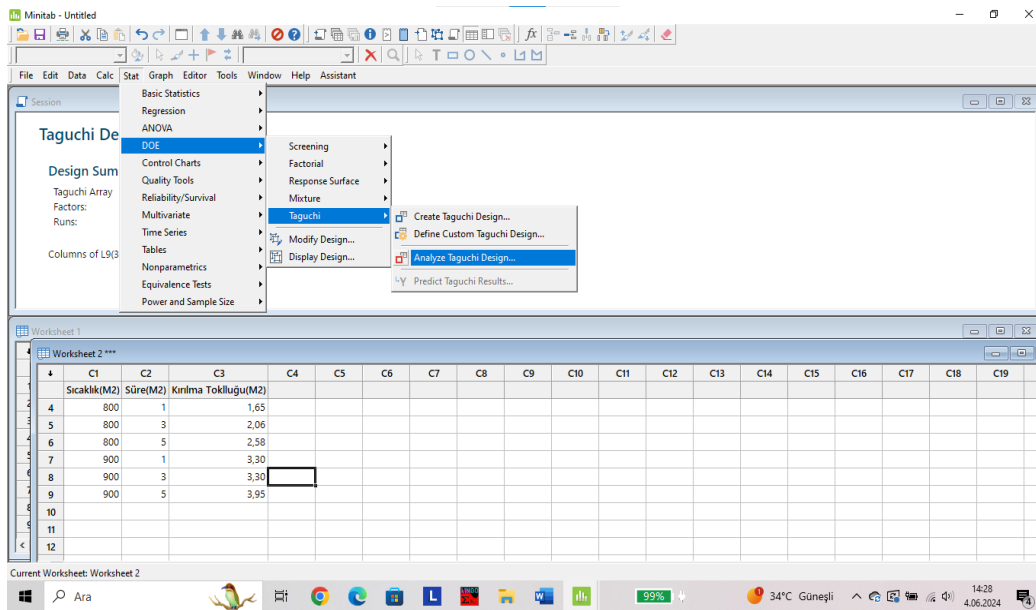
Deney parametrelerine göre sonuçlar Şekil 4.95.'de hesaplanır.



Şekil 4.95. Minitab programı Taguchi deney sonuçları arayüzü.

5. Adım

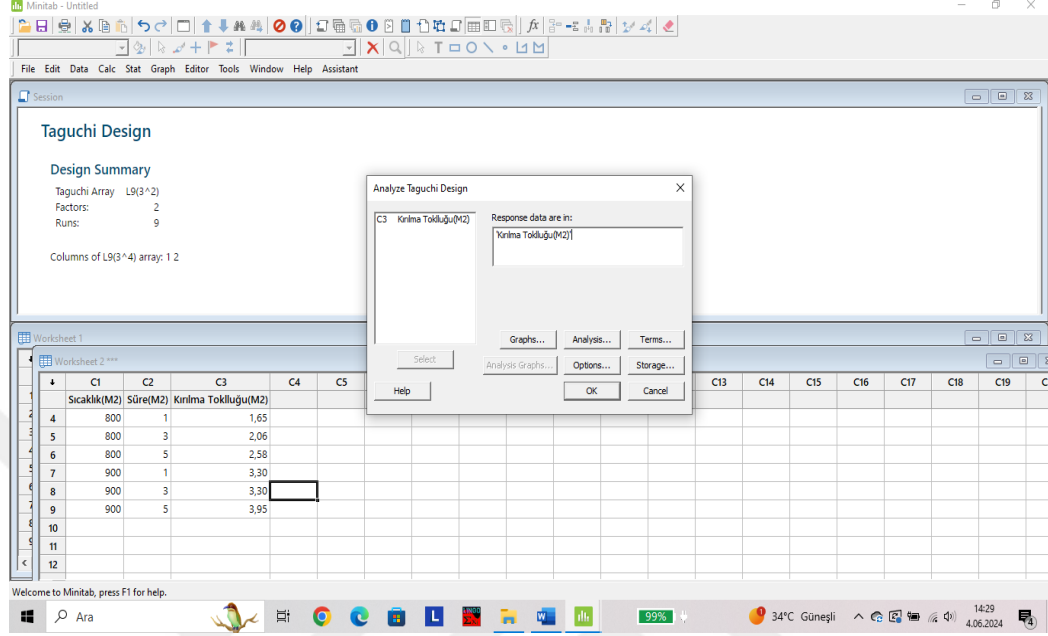
Şekil 4.96.'da deney sonuçları girilir. 'Analyze Taguchi Design' ile sonuç değerleri kullanılır.



Şekil 4.96. Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu test üretimlerinin proses çıktı değerleri

6. Adım

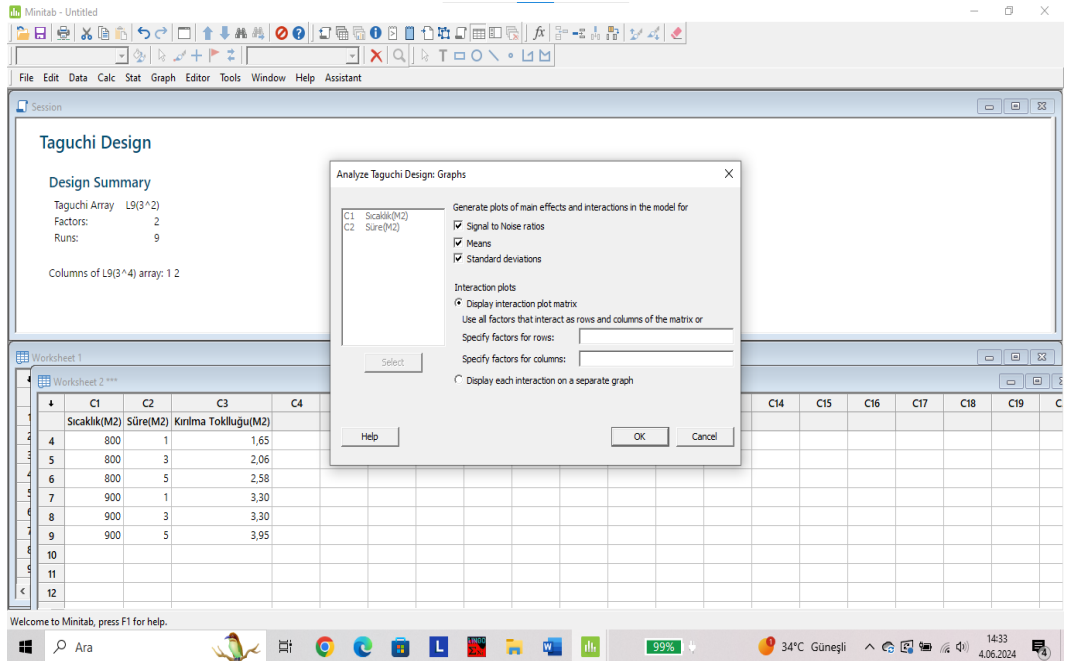
Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçlarını kullanmak için kutuya ismi Şekil 4.97.'deki gibi tanıtılır.



Şekil 4.97. Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu tasarım arayüzü

7.Adım

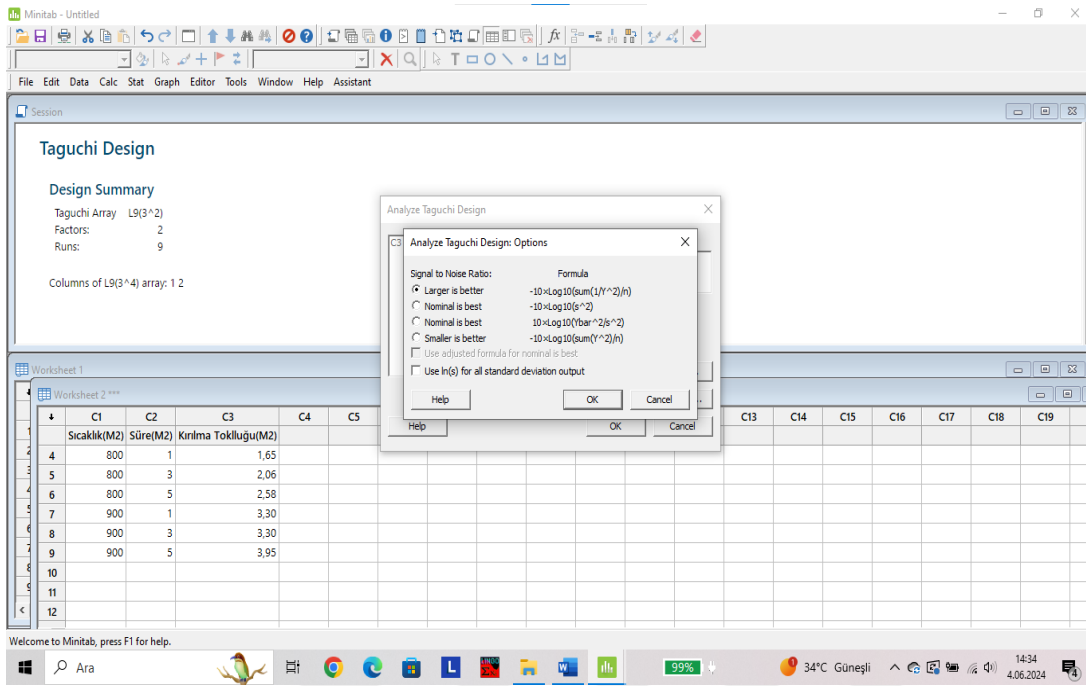
Şekil 4.98.'de performans ölçümü yapılır.



Şekil 4.98. Minitab programı Taguchi deney tasarım sinyal /gürültü aracı arayüzü

8.Adım

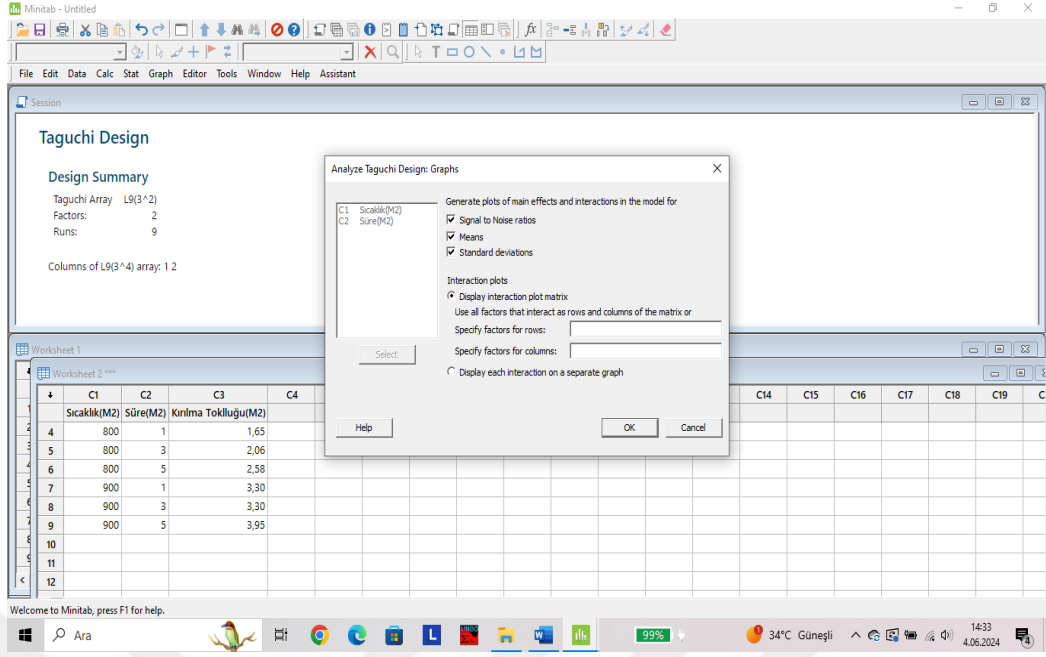
Şekil 4.99.'da görüldüğü üzere 'Larger is better' seçilir.



Şekil 4.99. Taguchi deney tasarımı 'Larger is better' arayüzü

9. Adım

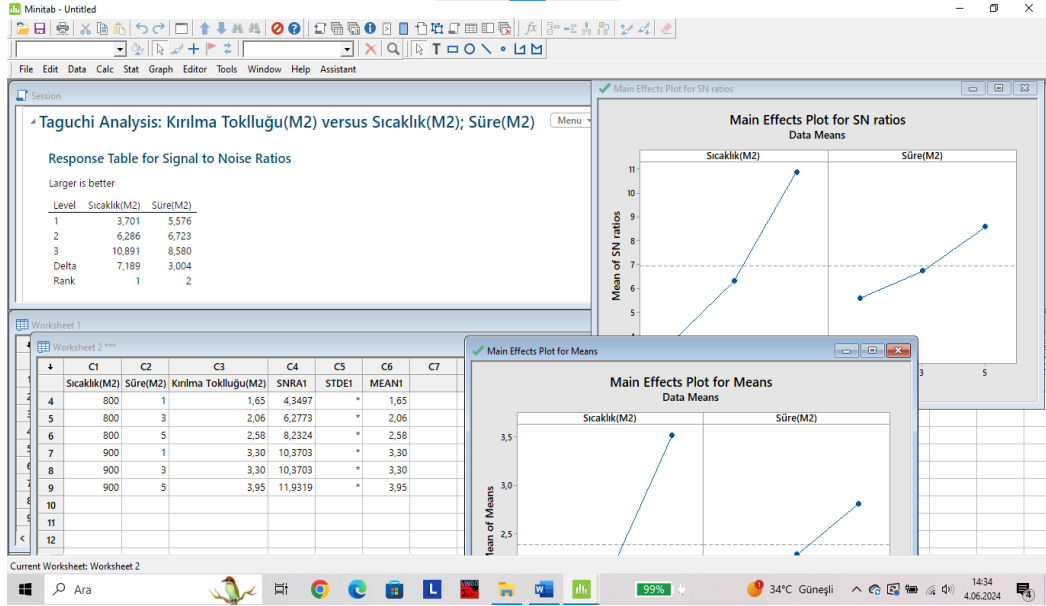
Şekil 4.100.'de Storge kutular seçilir, beyaz panele bu değerlerin depolanması sağlanır. Program sonuçları depolar.



Şekil 4.100. Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu sinyal / gürültü oranı hesabı arayüzü

10. Adım

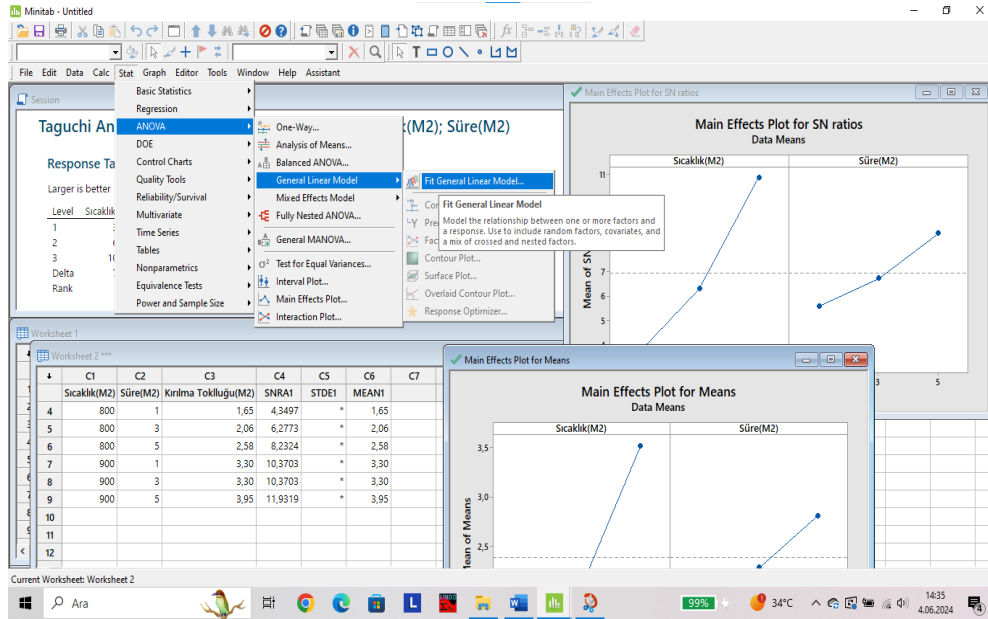
Şekil 4.101.'de sıcaklık, süre ve kırılma tokluğu için sinyal gürültü oranı ve sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 4.101. Kaplanmış AISI M2 çeliği sıcaklık ve süre için sinyal / gürültü oranı grafiği

11. Adım

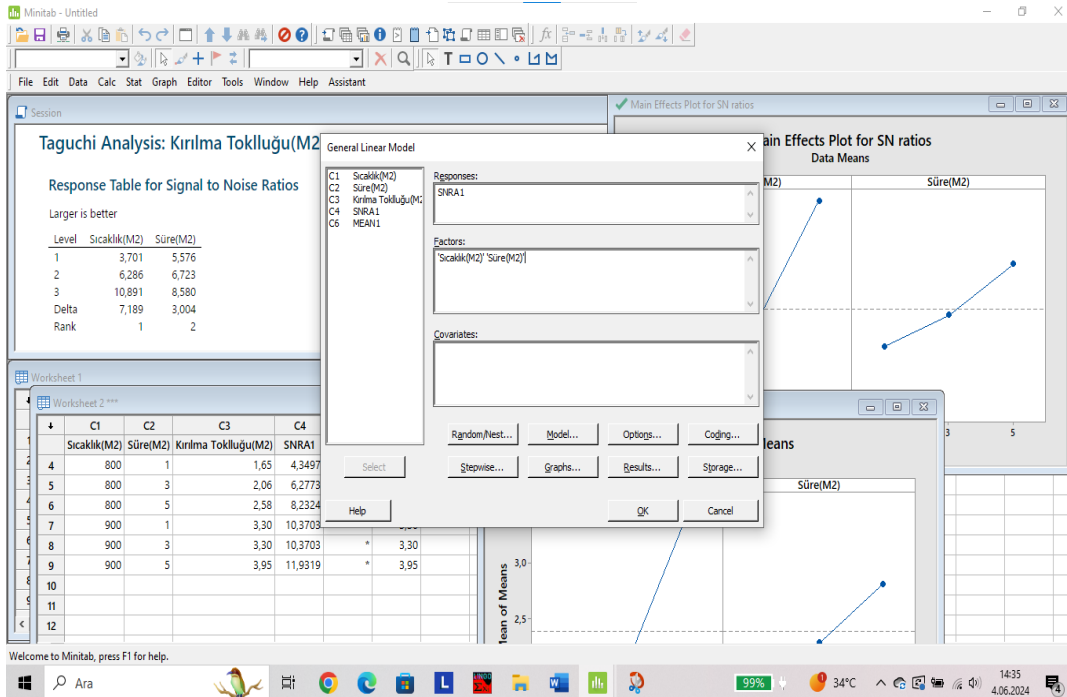
Şekil 4.102.'de modelin kalitesini ölçmek için ANOVA testi uygulanır.



Şekil 4.102. Minitap programı kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu Anava testi hesaplama arayüzü

12. Adım

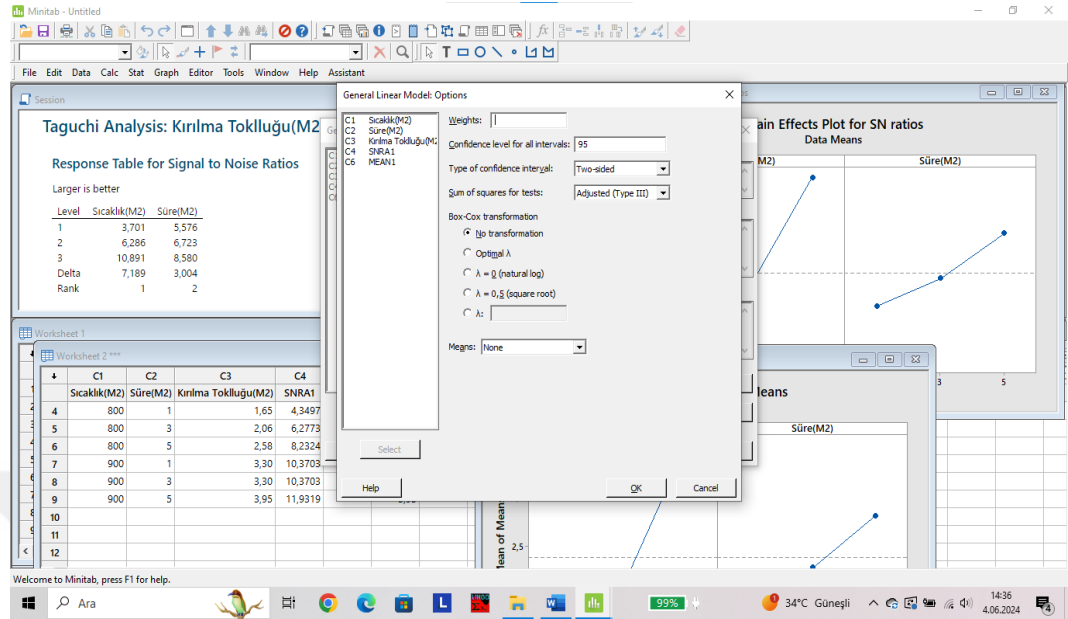
Şekil 4.103.'de sıcaklık ve süre faktörleri 'factors' kutusuna eklenir.



Şekil 4.103. Anova testi güven düzeyi analizi

13. Adım

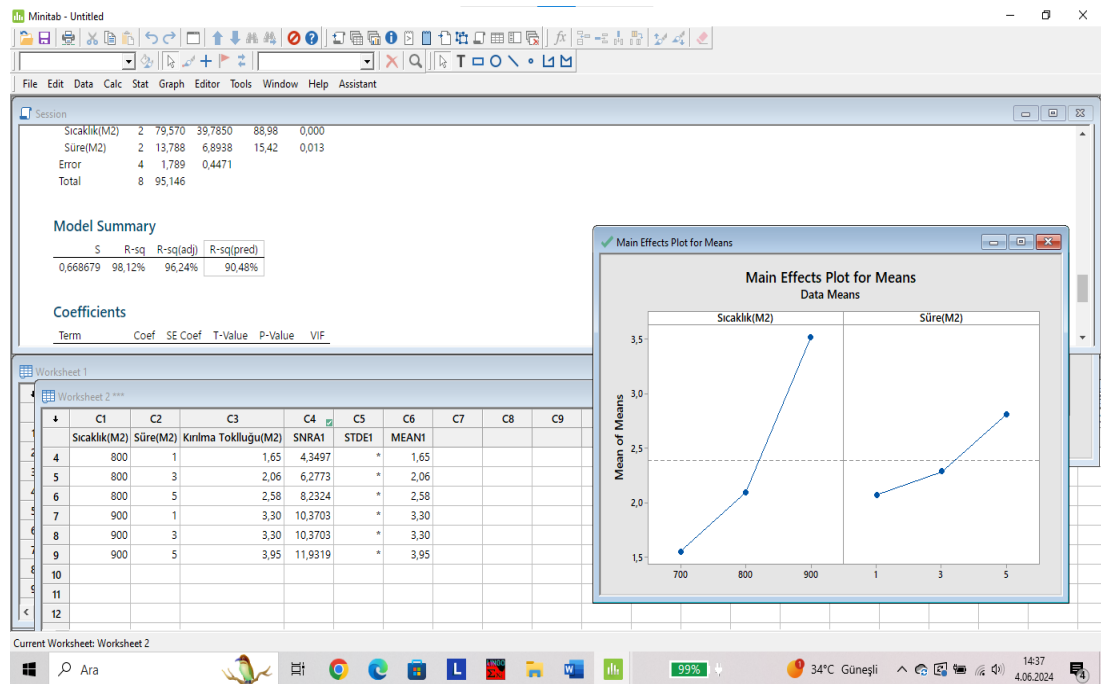
Şekil 4.104.'de %95 güven düzeyinde analiz yapılır.



Şekil 4.104. Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu F, P testi ve model analiz sonuçları

14. Adım.

Sonucunu görmek istediğimiz tablolar Şekil 4.105.'deki gibi seçilir. 'Model summary' yeterli olur.



Şekil 4.105. Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu Model Summary arayüzü

Şekil 4.106.'da kaplanmış AISI M2 çeliği için Taguchi deney tasarımı analizi yapılmıştır.

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3²)
Factors: 2
Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2

Taguchi Analysis: Kırılma tokluğu (M2) versus Sıcaklık; Süre

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

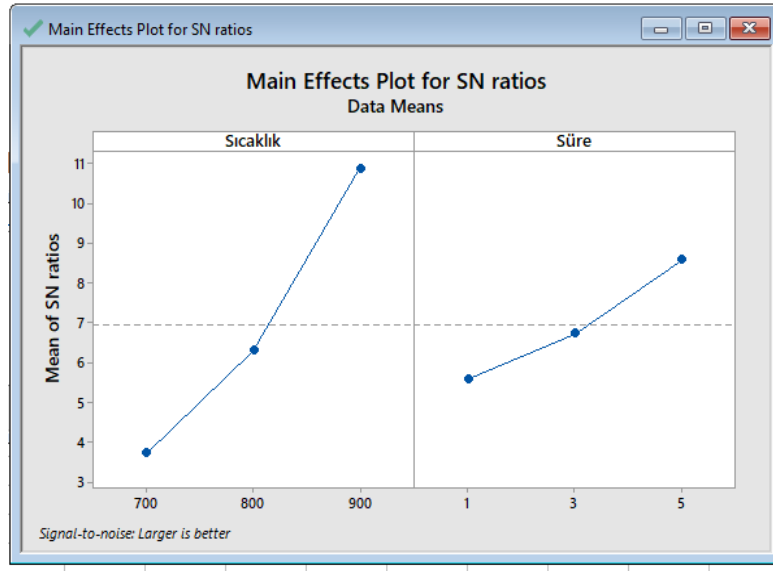
Level	Sıcaklık	Süre
1	3,701	5,576
2	6,286	6,723
3	10,891	8,580
Delta	7,189	3,004
Rank	1	2

Response Table for Means

Level	Sıcaklık	Süre
1	1,553	2,070
2	2,097	2,287
3	3,517	2,810
Delta	1,963	0,740
Rank	1	2

Şekil 4.106. M2 çeliği Taguchi deney tasarımı analizi

Aşağıdaki Şekil 4.107.'de görüldüğü gibi kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu, Taguchi Deney Tasarımı analizi ile S/G oranı hesaplanmıştır.



Şekil 4.107. Kaplanmış AISI M2 çeliği faktörlerin kırılma tokluğu üzerindeki seviyeleri

Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu için yapılan Taguchi deney tasarımı modelinde Şekil 4.107.'de sıcaklık 900°C' de uygundur. 700°C ve 800°C çizginin altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C

en uygun değer parametresidir. Süre olarak 5 saat kabul edilebilir değerdir. 1 saat ve 3 saat çizginin altında kalmıştır. Kaplanmış AISI M2 çeliği için yapılan deneyde, kırılma tokluğu sonuçlarına bakılarak sıcaklık 900°C’ de uygundur. Süre ise 5 saat olup en uygun değerdir.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	79,570	39,7850	88,98	0,000
Süre	2	13,788	6,8938	15,42	0,013
Error	4	1,789	0,4471		
Total	8	95,146			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,668679	98,12%	96,24%	90,48%

Şekil 4.108. Kaplanmış AISI M2 çeliği Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Şekil 4.108.’de görüldüğü üzere kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanarak R kare değeri %98,12 bulunmuştur. Çıkan sonuca bakılarak kurulan modelin başarılı olduğunu gösterir. ‘P’ değeri 0,005’in altında başarılıdır. ‘P’ değeri sıcaklık için 0,000 hesaplanmıştır. Süre için 0,013 olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık 0,005’in üstünde çıktığı için anlamlı değildir.

F değerine bakıldığında sıcaklık için 88,98 hesaplanmıştır. Süre için ‘F’ değeri 15,42 çıkmıştır. Bunun anlamı ‘F’ değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre sıcaklık birinci derecede önemli parametredir, süre ise ikinci derecede önemli parametredir.

4.12. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 Sertlik Sonuçlarına Göre Taguchi Deney Tasarım Modeli

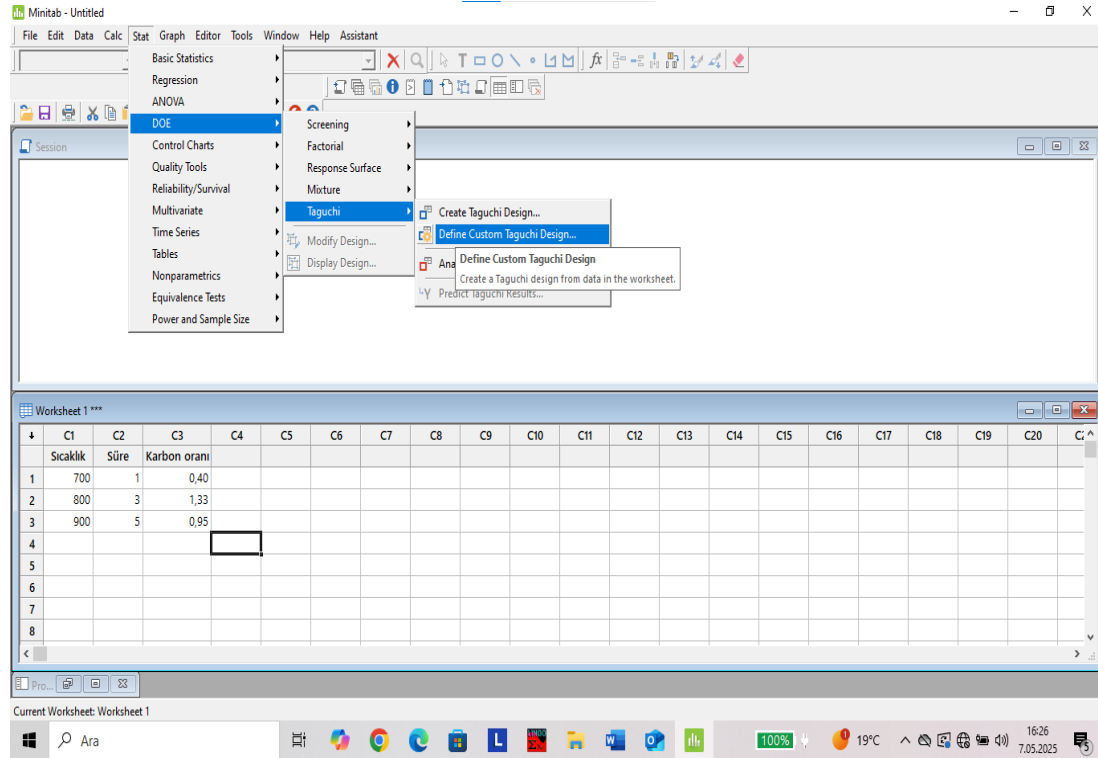
Tablo 4.14. 15 µm yüzeyden itibaren demir alüminid ile kaplanan AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için sertlik dağılımları

Yüzeyden itibaren mesafe (15 µm)	Sertlik (HV) (Kg/mm ²)									% Karbon miktarı
Sıcaklık (°C)	700			800			900			
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5	
AISI 4140	908,3	950,0	908,3	960,0	908,3	907,6	952,1	1003,2	950,0	0,40
AISI D2	952,4	952,4	955,5	1058,0	1117,8	1058,2	1113,9	1003,2	1058,2	1,33
AISI M2	1003,2	1058,2	1058,2	1113,9	1178,4	1178,4	1113,9	1113,9	1113,9	0,95

Minitab Programında Analiz İçin İşlem Adımları

1.Adım

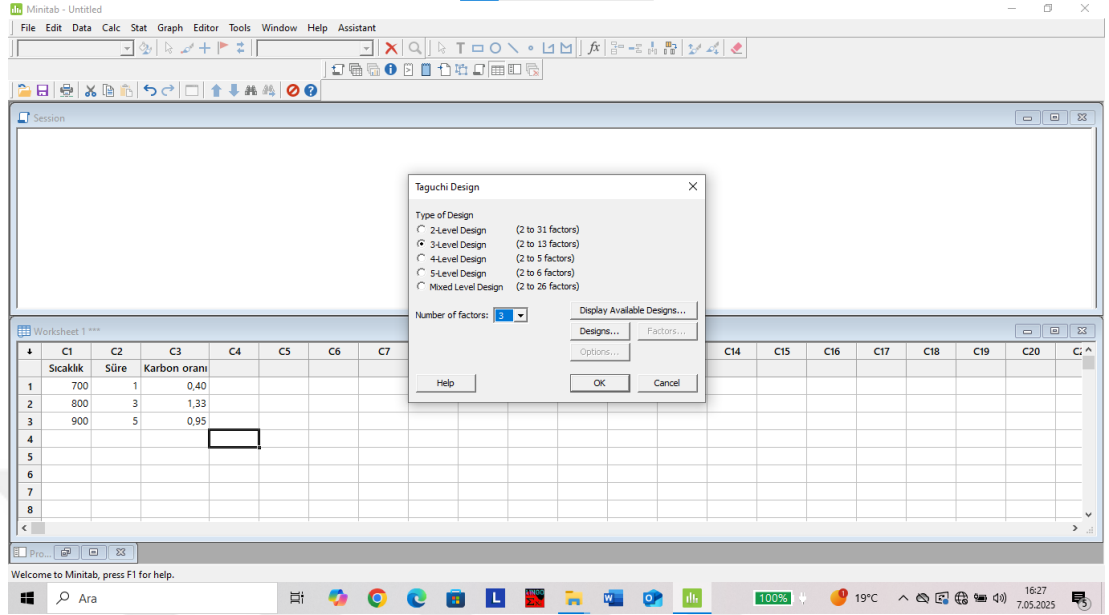
Şekil 4.109.'da parametre isimleri ve değerleri girilir. DOE - TAGUCHI-CREATE TAGUCHI – DESIGN tıklanır.



Şekil 4.109. Tasarım arayüzü

2.Adım

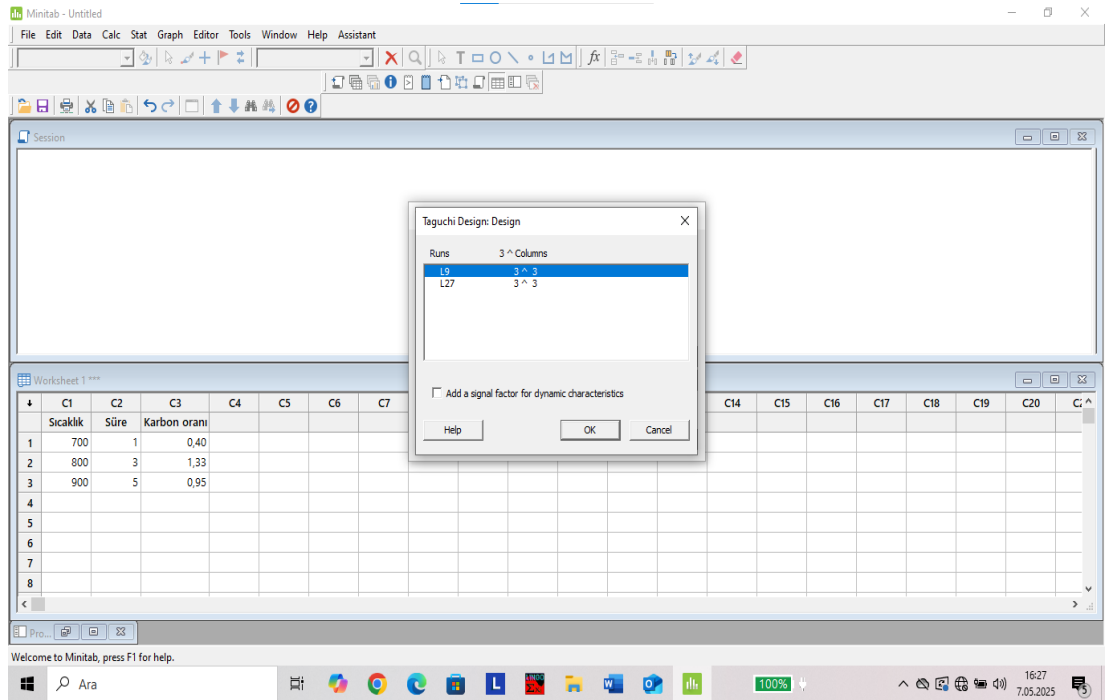
Sıcaklık ve süre değerlerinin tanımlanması Şekil 4.110’da yapılır.



Şekil 4.110. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için faktörlerin programa girilmesi

3.Adım

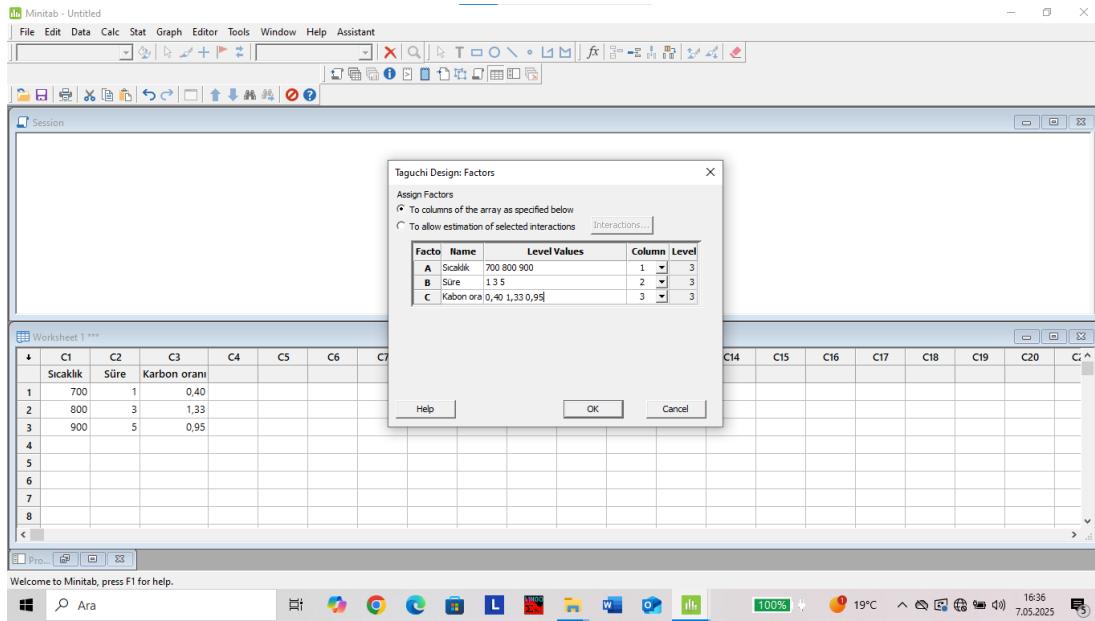
Şekil 4.111.’de modelin level sayısı belirlenir. Model 3 sütuna sahip olduğu için level 3 seçilir. 3 parametre olduğundan dolayı faktör sayısı 3 seçilir.



Şekil 4.111. Taguchi deney tasarımı level seviyesi belirleme arayüzü

4. Adım

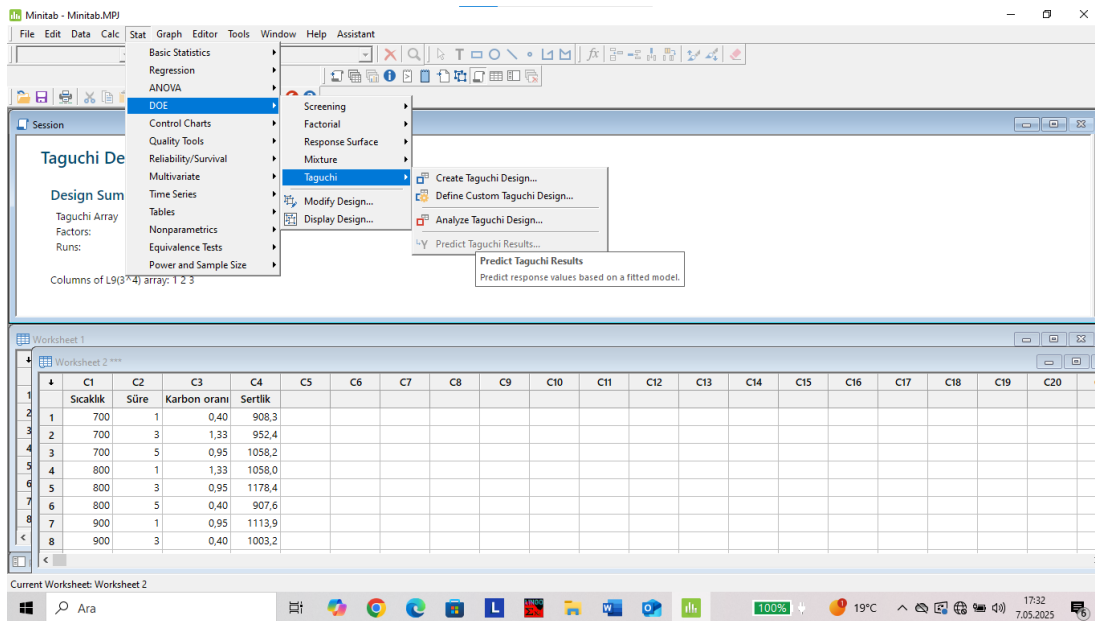
Şekil 4.112.'de dokuz farklı deney gerçekleştirir ve çıktılar buradan elde edilir.



Şekil 4.112. Taguchi deney tasarımı deney sayısı arayüzü

5. Adım

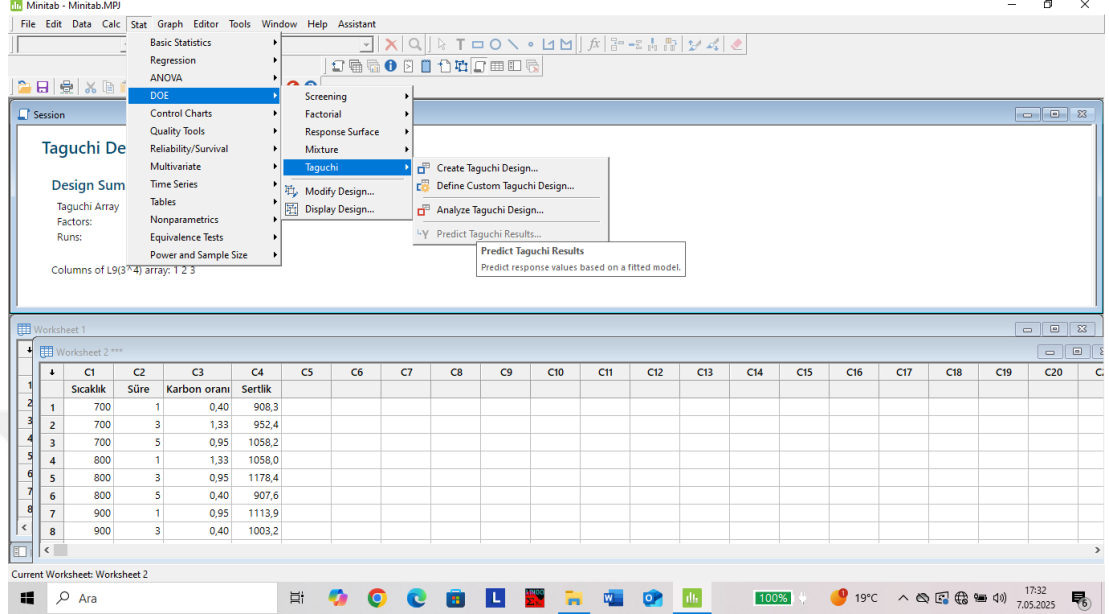
Şekil 4.113.'de deney parametrelerine göre sonuçlar hesaplanır.



Şekil 4.113. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için sertlik deney sonuçlarına göre sonuç hesaplama arayüzü

6. Adım

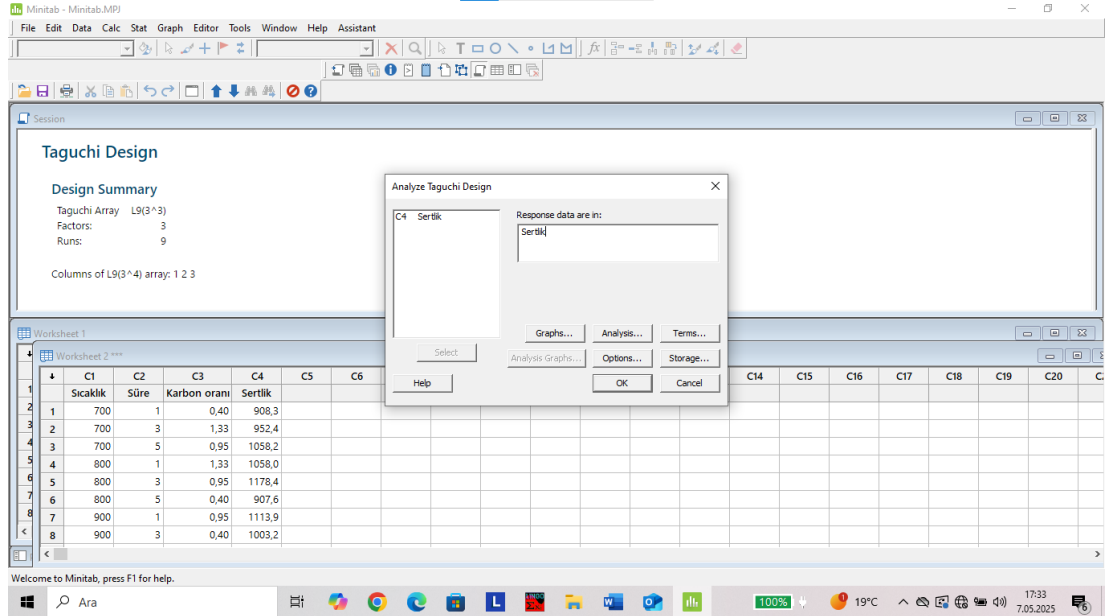
Şekil 4.114.'de sertlik deney sonuçları girilir.Sonuç değerlerimizi kullanmak için 'Analyze Taguchi Design' ile sonuç değerleri kullanılır.



Şekil 4.114. Taguchi test üretimlerinin proses çıktı değerleri.

7. Adım

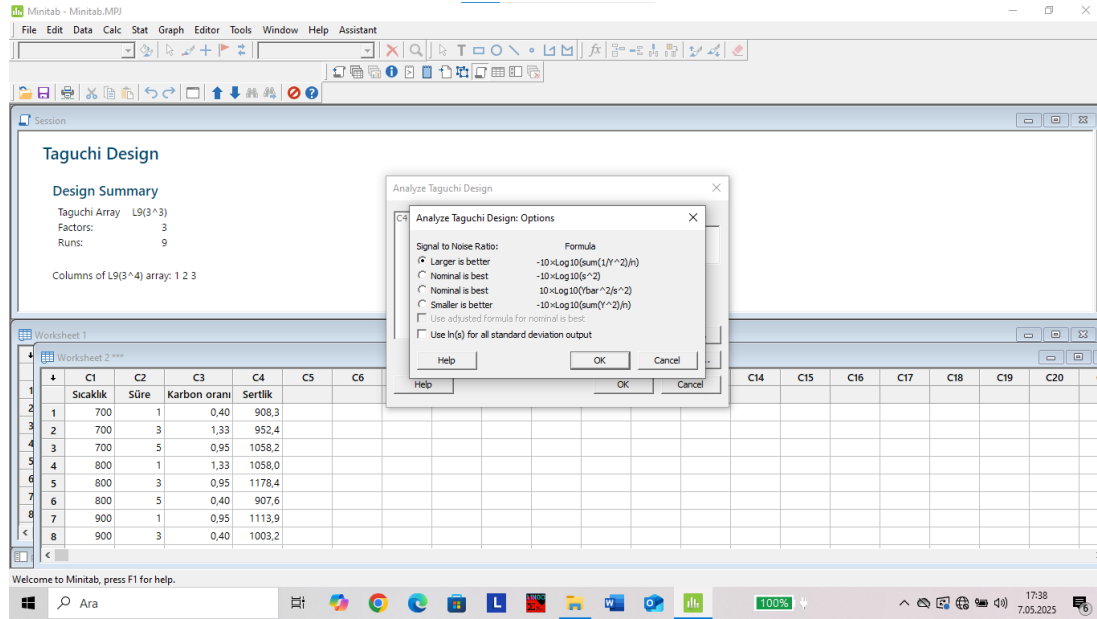
Şekil 4.115.'de sertlik deney sonuçlarını kullanmak için kutuya ismi tanıtılır.



Şekil 4.115. Minitab programı sertlik değerleri için taguchi deney tasarım arayüzü

8. Adım

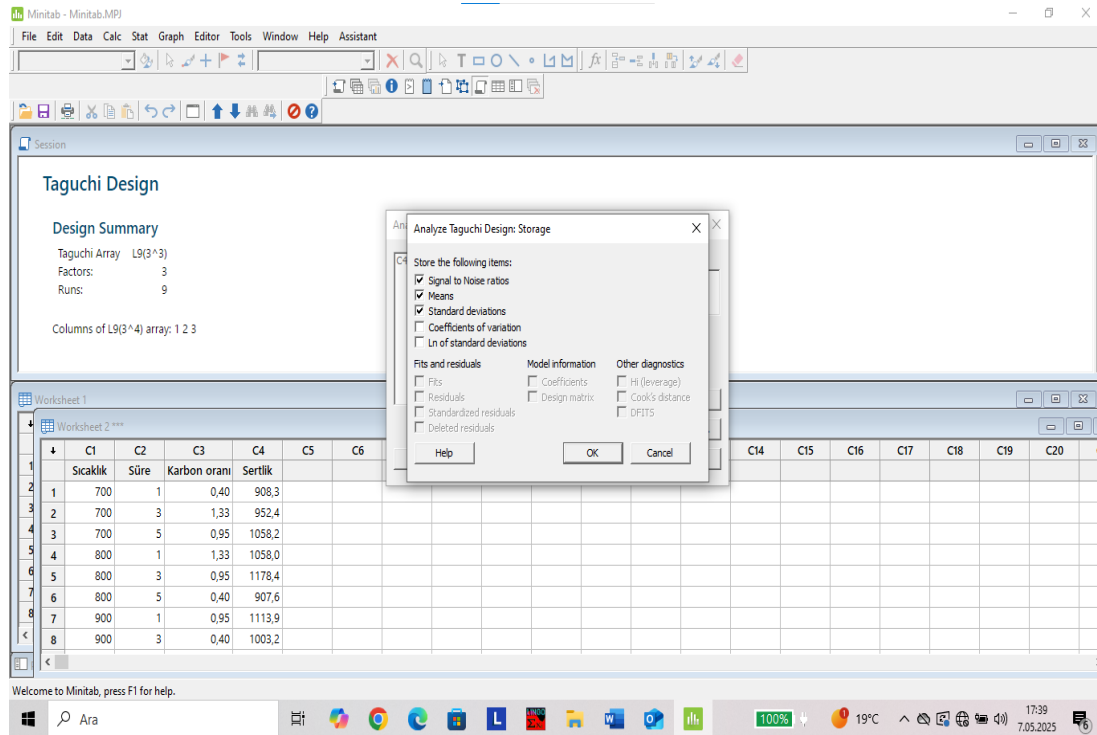
Şekil 4.116.'da performans ölçümü yapılır.



Şekil 4.116. Taguchi deney tasarımı sinyal/gürültü arayüzü

9. Adım

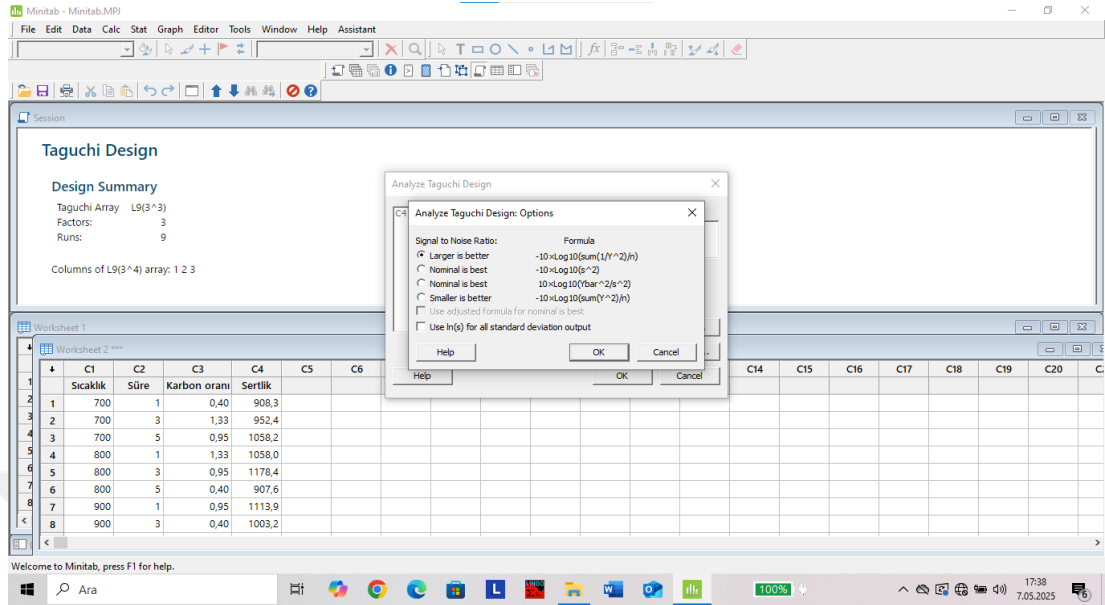
Şekil 4.117.'de ilgili kutular seçilir.



Şekil 4.117. Taguchi deney tasarımı sinyal/gürültü arayüzü

10.Adım

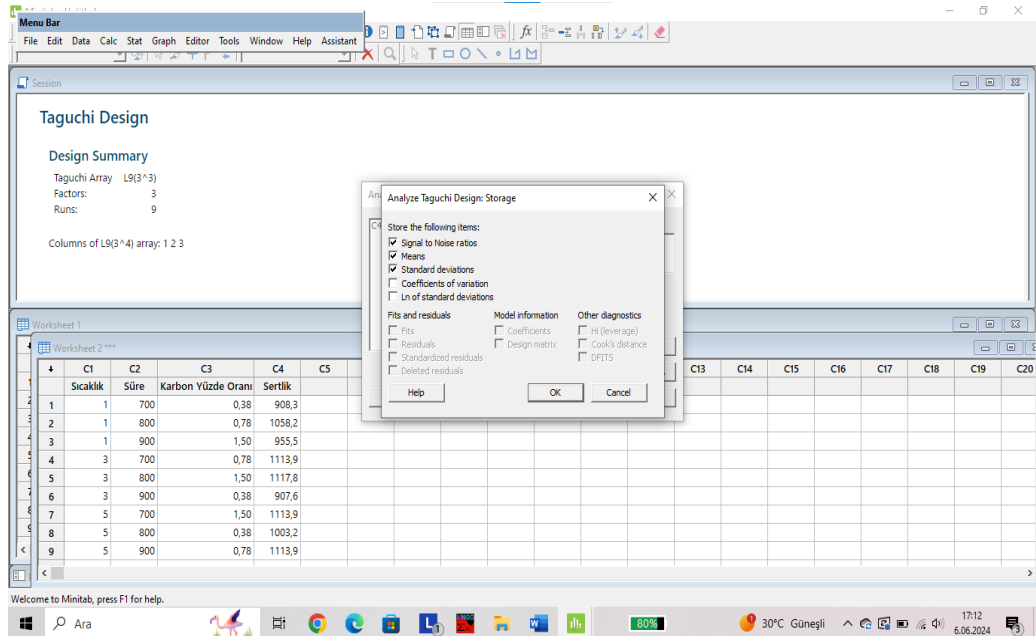
Şekil 4.118.'de 'Larger is better' seçilir.



Şekil 4.118. Sinyal/gürültü oranı hesabı arayüzü

11. Adım

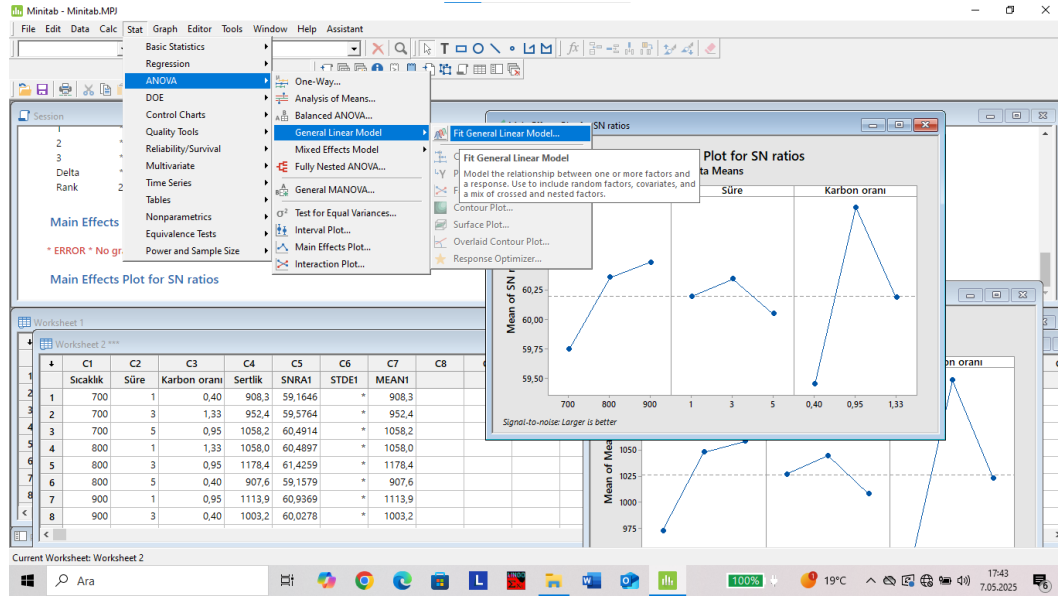
Şekil 4.119.'da stroge bölümünde yer alan ilgili kutular seçilir ve beyaz panele bu değerlerin depolanması sağlanır. Program sonuçları depolama yapar.



Şekil 4.119. Sinyal/gürültü oranı hesabı arayüzü

12. Adım

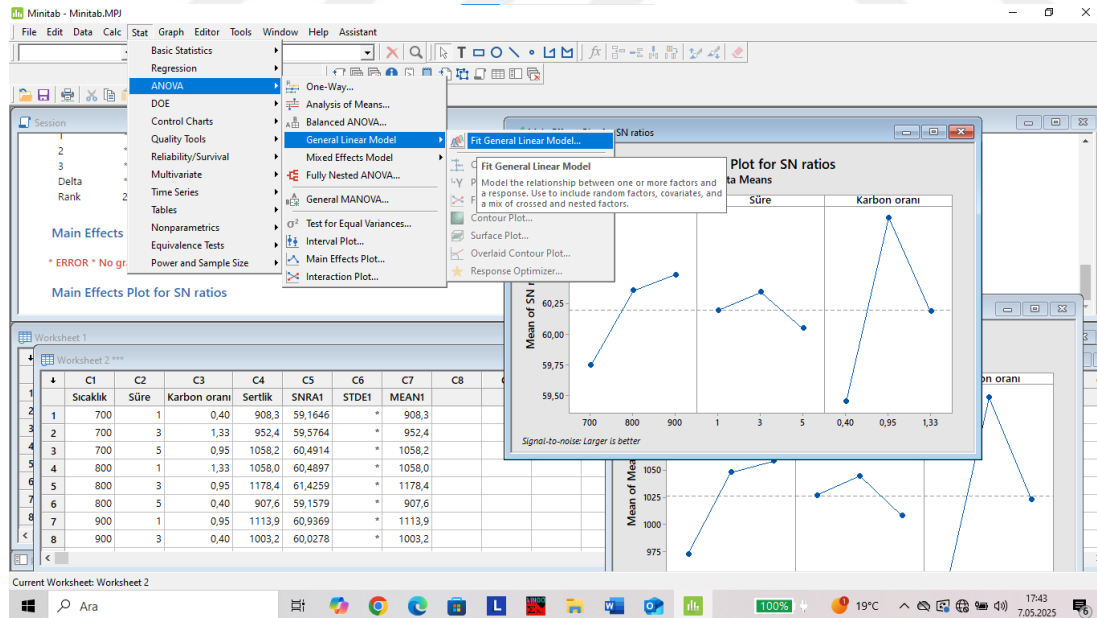
Şekil 4.120.'de süre, sıcaklık ve karbon parametreleri için sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 4.120. Sıcaklık ve süre için sinyal/gürültü oranı grafiği

13. Adım

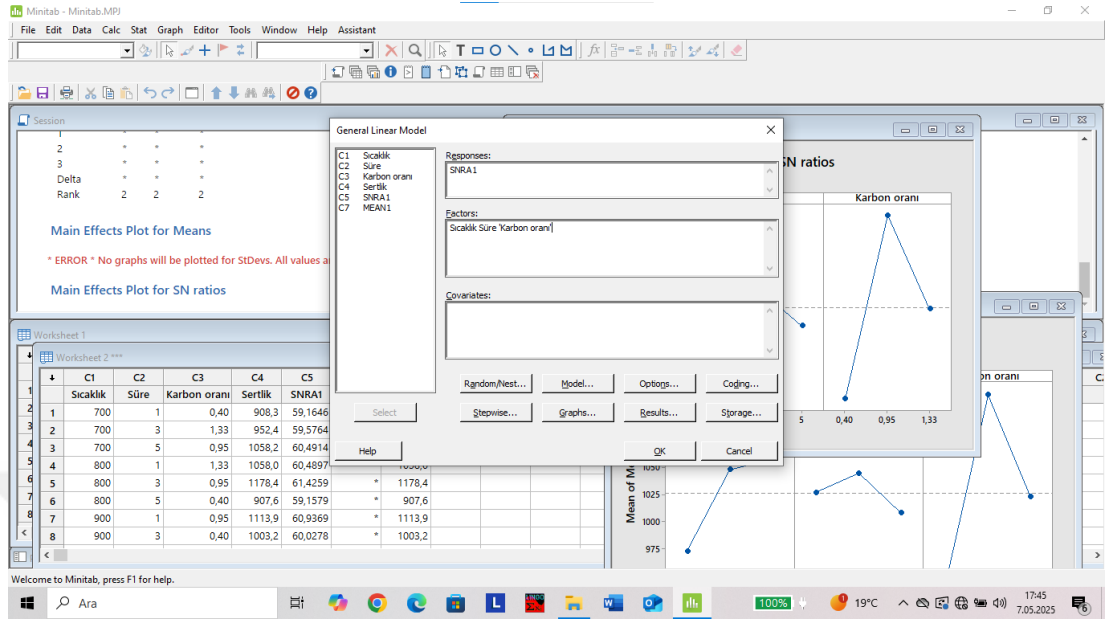
Şekil 4.121.'de kalite ölçümü için ANOVA testi uygulanır.



Şekil 4.121. Minitap programı Anavo testi hesaplama arayüzü

14.Adım

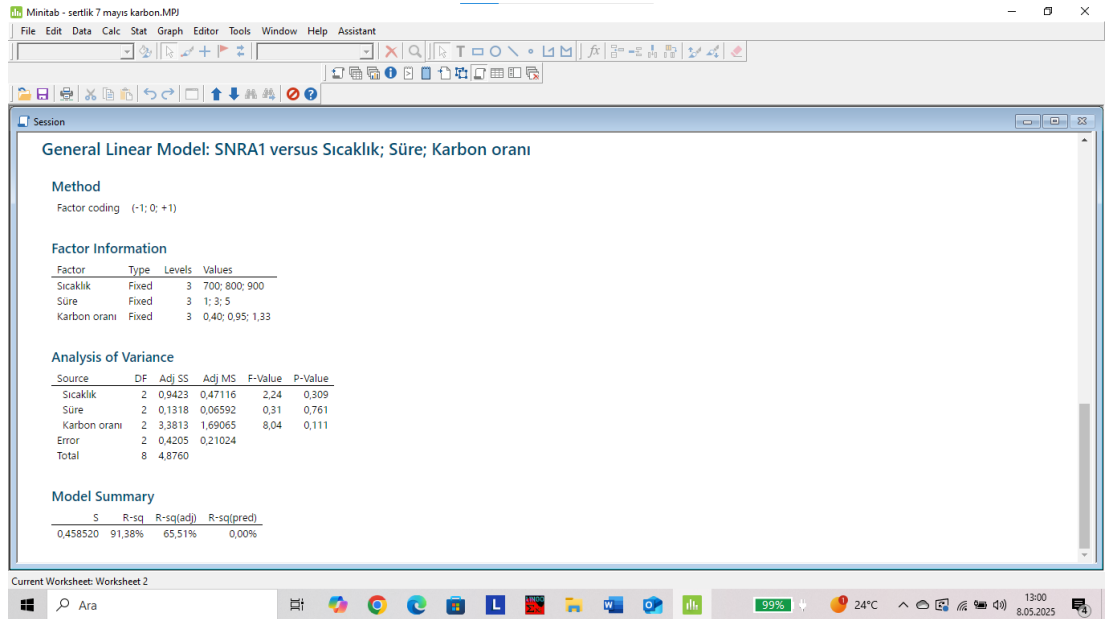
Şekil 4.122.'de %95 güven aralığında analiz yapılır



Şekil 4.122. %95 Güven aralığı Anova testi analizi

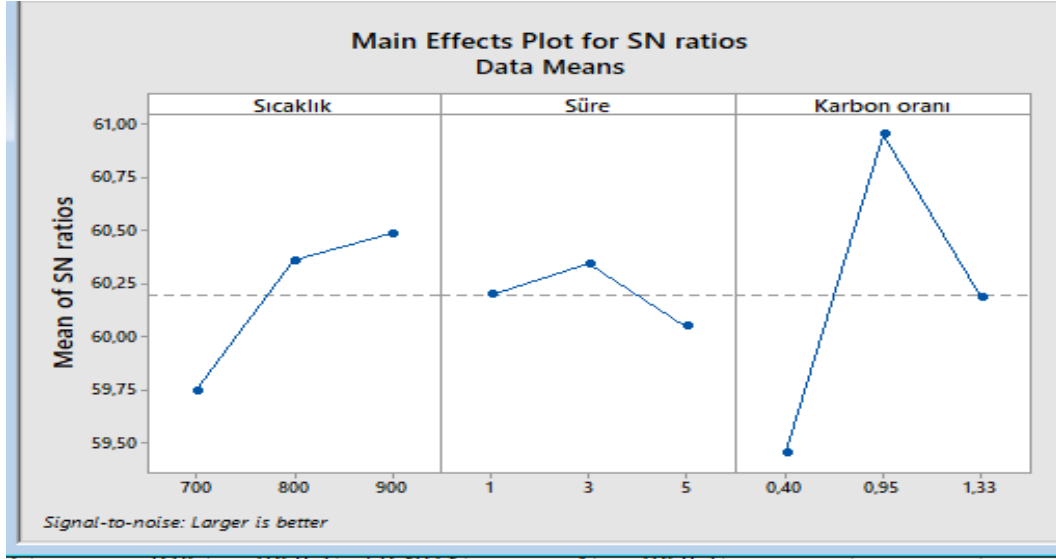
15.Adım

Şekil 4.123.'de, F test sonucu, P test sonucu ve analiz sonuçları yer almaktadır. R-kare değeri modelin anlamlılığını açıklar ve bu değer %91,38 olarak hesaplanmıştır. Modelin başarılı olduğu anlamına gelir.



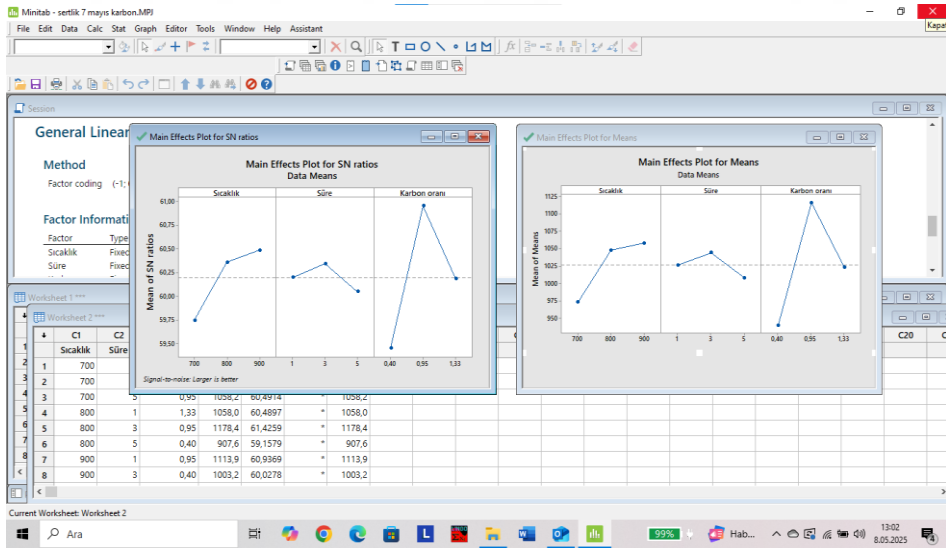
Şekil 4.123. R kare değeri, F, P testi ve model analiz sonuçları

Şekil 4.124.'te kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için zaman, sıcaklık ve karbon yüzde oranlarına bağlı olarak sertlik Taguchi deney tasarımı analiz sonuçları yer almaktadır.



Şekil 4.124. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için zaman, sıcaklık ve karbon yüzde oranlarına bağlı olarak sertlik Taguchi deney tasarımı analizi

Şekil 4.125.'de S/G (sinyal gürültü oranı) hesaplanmıştır.



Şekil 4.125. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için faktörlerin sertlik düzeyleri üzerindeki seviyeleri

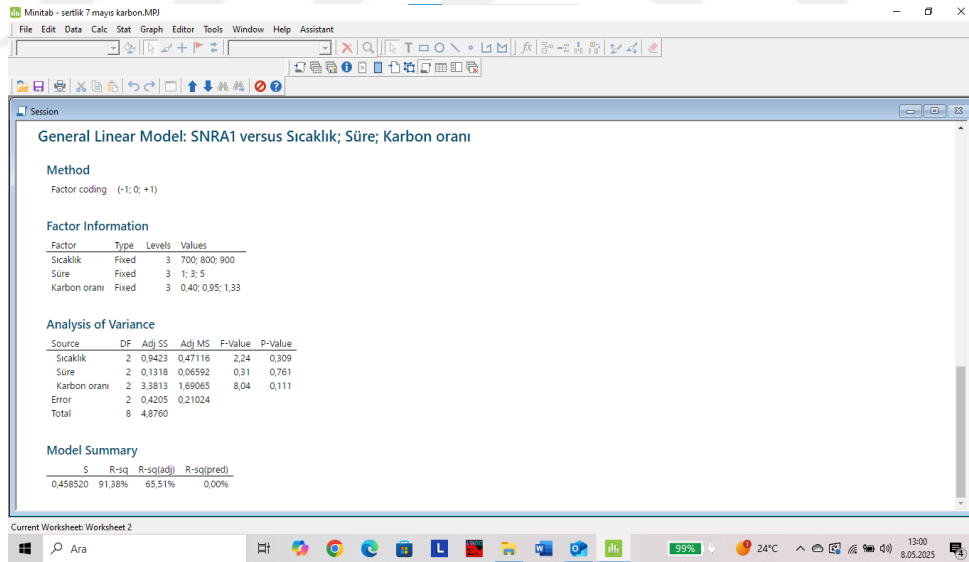
Süre 5 saat ortalamasının altında kalmıştır. 1 saat süre ise ortalama ile çakışık çıkmıştır uygun değildir. 900°C de 3 saat en uygun değerdir. Çeliklerin içerdikleri karbon yüzdelere bakılırsa 0,95 karbon yüzdesi içeren AISI M2 çeliği en iyi sonucu

vermiştir.1,33 karbon yüzdesine sahip kaplanmış AISI D2 çeliği çizgi ile çakışık çıkmıştır ve neredeyse ortalamanın altına kaymış gibi görüldüğünden dolayı uygun değildir.0,40 karbon yüzdesine sahip olan kaplanmış AISI 4140 çeliğide ortalamanın altında çıktığı için uygun değildir.En ideal parametre değerleri; 900°C de 3 saat süreyle kaplanmış AISI M2 çeliği olmuştur. Aşağıda yer alan Şekil 4.126.‘da çeliklerin sertlik değerleri deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır.

R kare değeri %91,38 çıkmıştır. R kare değerine bakıldığı zaman modelin doğru kurulduğu anlaşılır. ‘P’ değeri 0,005’in altınada başarılıdır. ‘P’ değeri sıcaklık için 0,309 hesaplanmıştır. Süre için 0,761 olarak hesaplanmıştır. Karbon yüzdelere göre ‘P’ değeri 0,111 hesaplanmıştır.

4.13. Anova Testi Sonuçları

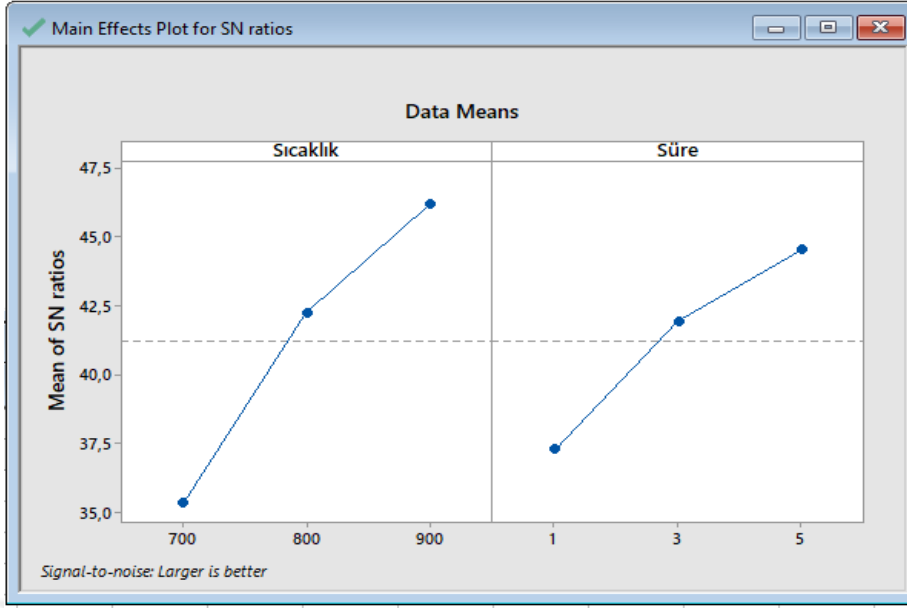
Bu çalışmada ANOVA testi yapılmıştır.Her bir faktörün F ve P değerleri bulunmuştur. Yüzde %95 güven seviyesinde hesaplanan P değerlerinin 0,005’in altında çıkması her bir faktörün deney üzerinde etkisinin olduğunu bize göstermektedir.



Şekil 4.126. Kaplanmış çelikler için zaman, sıcaklık ve karbon yüzde oranlarına bağlı olarak sertlik seviyeleri Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

4.13.1. Kaplanmış AISI 4140 çeliği kaplama kalınlığı sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli

Şekil 4.127.’de kaplanmış AISI 4140 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri yer almaktadır.



Şekil 4.127. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri

Kaplanmış AISI 4140 çeliği kaplama kalınlığı için yapılan Taguchi deney tasarımına göre Şekil 4.127.'de 800°C'de ve 900°C'de uygundur. 700°C uygun olmayan sıcaklık değeridir çünkü ortalamanın altında kalmıştır. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak 3 saat ve 5 saat kabul edilebilir değerlerdir. Süre 1 saat ortalamanın altında kaldığı için uygun değildir. Bu deney için 5 saat en uygun süredir. AISI 4140 çeliği için yapılan deneyde kaplama kalınlığı sonuçlarına göre süre olarak 5 saat sıcaklık ise 900°C en uygun değerdir.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	180,456	90,2281	208,49	0,000
Süre	2	80,776	40,3879	93,33	0,000
Error	4	1,731	0,4328		
Total	8	262,963			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,657846	99,34%	98,68%	96,67%

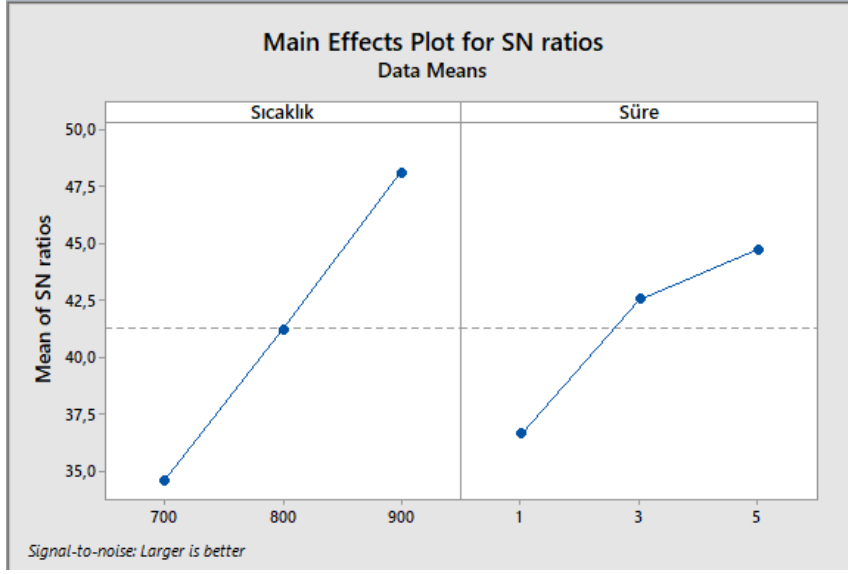
Şekil 4.128. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Şekil 4.128.'de Anova test sonuçlarına göre kaplanmış AISI 4140 çeliği kaplama kalınlığı R kare değeri %99,34 çıkmıştır. R kare sonucuna göre model başarılıdır. 'P' değeri 0,005'in altınada başarılıdır. 'P' değeri sıcaklık için 0,000 hesaplanmıştır. Süre 0,000 çıkmıştır. Sıcaklık parametresi en doğru değeri veren değişkendir.

F değerine bakıldığında sıcaklık için 208,48 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 93,33 çıkmıştır. 'F' değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olacağı için sıcaklık birinci derecede önemli parametredir, süre ise ikinci derecede önemli parametredir.

4.13.2. Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli

Şekil 4.129.'da kaplanmış AISI D2 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri yer almaktadır.



Şekil 4.129. Kaplanmış AISI D2 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri

Kaplanmış AISI D2 çeliği kaplama kalınlığı Taguchi deney tasarımıyla sıcaklığın 900°C’ de en iyi değerdir. 800°C’ ortalama ile çakışık çıkmıştır. Ortalamanın altında olmadığı için bu yinede kabul edilebilir bir sıcaklıktır. 700°C ortalamanın altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak 3 saat ve 5 saat kabul edilebilir değerlerdir. Süre 1 saat ortalamanın altında kaldığı için uygun değildir. Kaplanmış AISI D2 çeliği için yapılan deneyde, kaplama kalınlığı sonuçlarına göre sıcaklık 900°C de en uygundur. Süre ise 5 saat en uygun değerdir.

Aşağıda yer alan Şekil 4.130.’da kaplanmış AISI D2 çeliğine kaplama kalınlığı deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır. Anova test sonuçlarına göre, R kare değeri %97,29 çıkmıştır. R kare değerine göre kurulan model başarılıdır. ‘P’ değeri 0,005’in altında başarılıdır. ‘P’ değeri sıcaklık için 0,001 hesaplanmıştır. Süre için 0,008 olarak hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık parametresi en doğru değeri veren değişkendir. F değerine bakıldığında sıcaklık için 51,77 hesaplanmıştır. Süre için ‘F’ değeri 19,98 çıkmıştır. Bunun anlamı ‘F’ değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre sıcaklık birinci derecede önemli parametre, süre ise ikinci derecede önemli parametredir.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	274,32	137,160	51,77	0,001
Süre	2	105,88	52,941	19,98	0,008
Error	4	10,60	2,649		
Total	8	390,80			

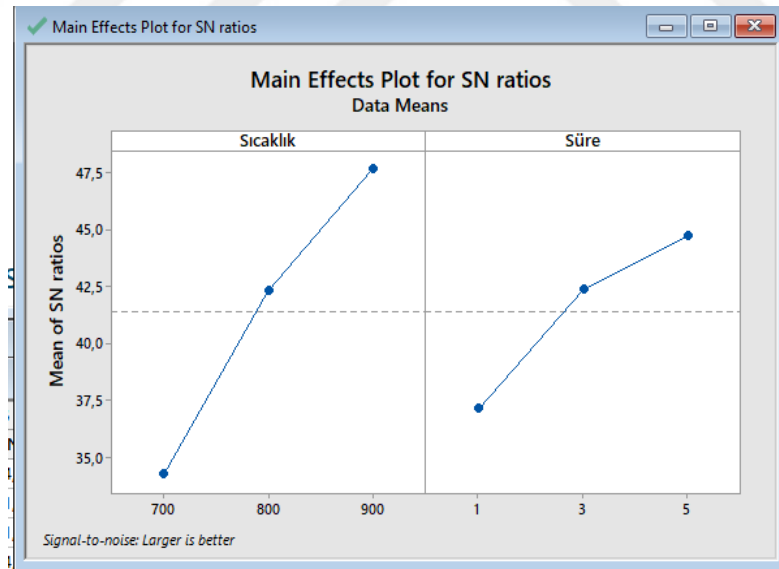
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,62768	97,29%	94,58%	86,27%

Şekil 4.130. Kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

4.13.3. Kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli

Şekil 4.131.'de kaplanmış AISI M2 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri yer almaktadır.



Şekil 4.131. Kaplanmış AISI M2 çeliği için faktörlerin kaplama kalınlığı üzerindeki seviyeleri

Anova test sonuçlarına göre sıcaklık 800°C'de ve 900°C'de uygundur. 900°C'de daha yüksek çıktığı için en iyi sonucu verir. 700°C çizginin altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için, 900°C en uygun değer

parametresidir. Süre olarak 3 saat ve 5 saat kabul edilebilir değerlerdir. Süre 1 saat çizginin altında kaldığı için uygun değildir. Bu deney için 5 saat iyi süredir.

Aşağıda görüldüğü gibi Şekil 4.132.'de kaplanmış AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri yer almaktadır.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre; ... ma kalınlığı (M2)

The following terms cannot be estimated and were removed:
Kaplama kalınlığı (M2)

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	274,339	137,169	281,86	0,000
Süre	2	91,336	45,668	93,84	0,000
Error	4	1,947	0,487		
Total	8	367,622			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,697613	99,47%	98,94%	97,32%

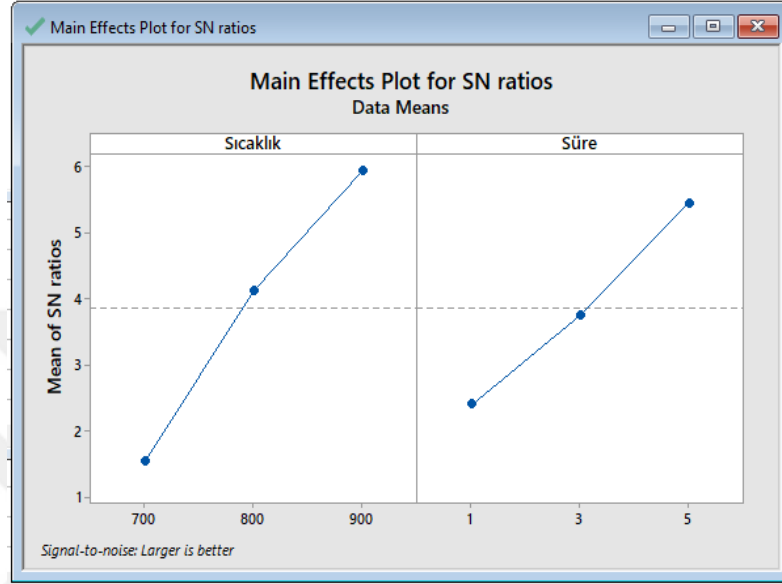
Şekil 4.132. Kaplanmış AISI M2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kaplama kalınlığı Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Kaplanmış AISI M2 çeliği kaplama kalınlığı deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır. R kare değeri %98,94 çıkmıştır. R kare değeri modelin anlamlılığını ölçer. Anova testine göre çıkan R kare değeri kurulan modelin başarılı olduğunu gösterir. 'P' değeri 0,005'in altınada başarılıdır. 'P' değeri sıcaklık için 0,000 hesaplanmıştır. Süre 0,000 bulunmuştur. Sıcaklık süre eşit düzeyde en doğru değeri veren değişkenlerdir.

F değerine bakıldığında sıcaklık için 281,86 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 93,84 çıkmıştır. Bunun anlamı 'F' değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre sıcaklık birinci derecede önemli parametredir, süre ise ikinci derecede önemli parametredir.

4.13.4. Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu sonuçlarına göre taguchi deney tasarım modeli

Şekil 4.133.'de kaplanmış AISI 4140 çeliği için faktörlerin kırılma tokluğu üzerindeki seviyeleri, Şekil 4.134'te ise Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4.133. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için faktörlerin kırılma tokluğu üzerindeki seviyeleri

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	29,289	14,6447	18,03	0,010
Süre	2	13,973	6,9863	8,60	0,036
Error	4	3,249	0,8123		
Total	8	46,511			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,901264	93,01%	86,03%	64,64%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3,863	0,300	12,86	0,000	
Sıcaklık					
700	-2,327	0,425	-5,48	0,005	1,33
800	0,257	0,425	0,61	0,578	1,33
Süre					
1	-1,465	0,425	-3,45	0,026	1,33
3	-0,116	0,425	-0,27	0,798	1,33

Şekil 4.134. Kaplanmış AISI 4140 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kırılma tokluğu Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

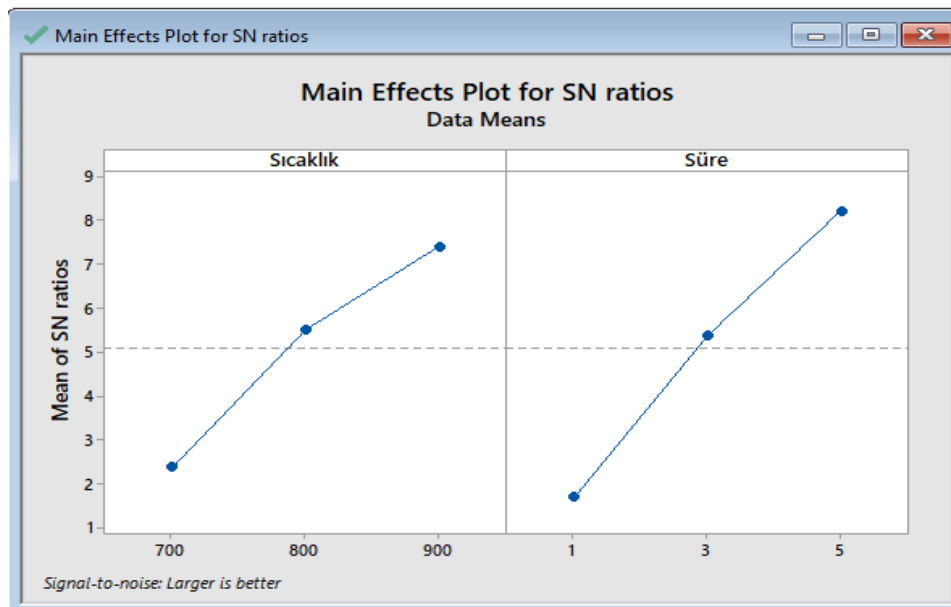
Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu deneyinde sıcaklık 800°C’de ve 900°C’de uygundur. 900°C’ de daha yüksek çıktığı için en iyi sonucu verir. 700°C ortalamasının altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre 1 saat ve 3 saat ortalamasının altında kaldığı için uygun değildir. Bu deney için 5 saat en uygun süredir.

Kaplanmış AISI 4140 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır. R kare değeri %93,01 çıkmıştır. Bu değer bize modelin anlamlı olduğunu gösterir. ‘P’ değeri 0,005’in altında başarılıdır. ‘P’ değeri sıcaklık için 0,010 hesaplanmıştır. Süre için 0,036 olarak hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık ve süre 0,005’in üstünde çıktığı için anlamlı değildir.

F değerine bakıldığında sıcaklık için 18,03 ve süre için ‘F’ değeri 8,60 hesaplanmıştır. ‘F’ değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olacağı için sıcaklık birinci derecede önemli parametredir, süre ise ikinci derecede önemli parametredir.

4.13.5. Kaplanmış AISI D2 çeliği kırılma tokluğu sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli

Kaplanmış AISI D2 çeliği kırılma tokluğu için yapılan Taguchi deney tasarımı modelinde Şekil 4.135.’de görüldüğü gibi 900°C’ de daha yüksek çıktığı için en iyi sonuç değeridir. 800°C ‘de uygundur. 700°C ortalamasının altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir.



Şekil 4.135. Kaplanmış AISI D2 çeliği için faktörlerin kırılma tokluğu üzerindeki seviyeleri

Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak 3 ve 5 saat kabul edilebilir değerlerdir. Bu deney için 5 saat en uygun süredir. Kaplanmış AISI D2 çeliği için yapılan bu deneyde kırılma tokluğu sonuçlarına göre sıcaklık 900°C ve süre 5 saat en iyi değerdir.

Aşağıda verilen Şekil 4.136.'da kaplanmış AISI D2 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	38,96	19,480	4,77	0,087
Süre	2	64,68	32,338	7,91	0,041
Error	4	16,35	4,087		
Total	8	119,98			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2,02165	86,37%	72,75%	31,02%

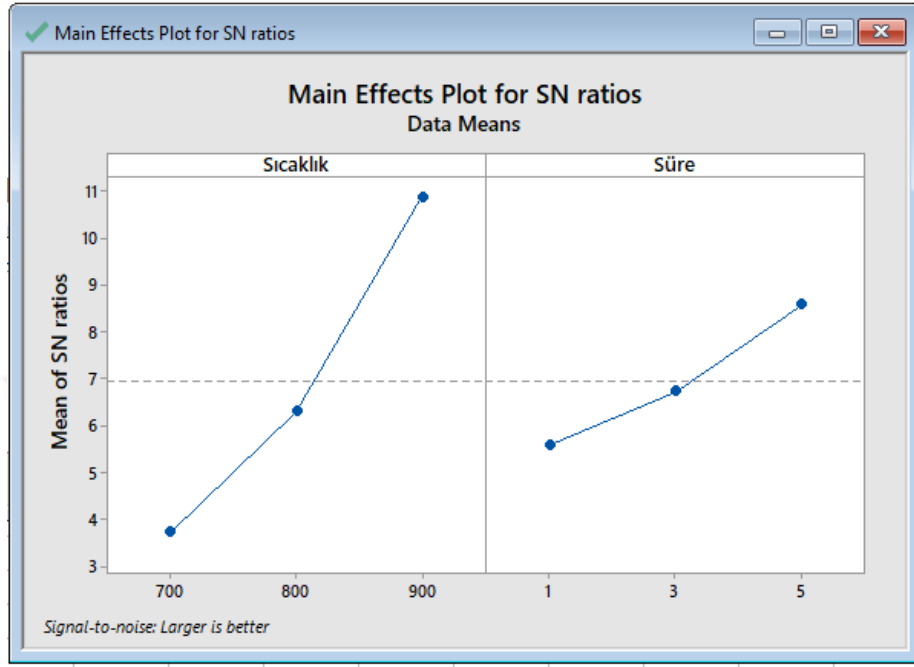
Şekil 4.136. Kaplanmış AISI D2 çeliği için zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kırılma tokluğu Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

R kare değeri % 86,37 çıkmıştır. Bu sonuca bakılarak kurulan modelin anlamlı olduğu anlaşılır. 'P' değeri 0,005'in altınada başarılıdır. 'P' değeri sıcaklık için 0,087 hesaplanmıştır. Süre için 0,041 olarak hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık ve süre 0,005'in üstünde çıktığı için anlamlı değildir.

F değerine bakıldığında sıcaklık için 4,77 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 7,91 çıkmıştır. Bunun anlamı 'F' değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre süre birinci derecede önemli parametredir, sıcaklık ise ikinci derecede önemli parametredir.

4.13.6. Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli

Şekil 4.137.'de kaplanmış AISI M2 çeliği için faktörlerin kırılma tokluğu üzerindeki seviyeleri yer almaktadır.



Şekil 4.137. Kaplanmış AISI M2 çeliği için faktörlerin kırılma tokluğu üzerindeki seviyeleri

Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu için yapılan Taguchi deney tasarımı modelinde Şekil 4.137.'de görüldüğü gibi sıcaklık 900°C'de uygundur. 700°C ve 800°C ortalamasının altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak 5 saat kabul edilebilir değerdir. Bu deney için 5 saat en uygun süredir. 1 saat ve 3 saat ortalamasının altında kalmıştır.

Şekil 4.138'de kaplanmış AISI M2 çeliği için kırılma tokluğu Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri yer almaktadır. Kaplanmış AISI M2 çeliği kırılma tokluğu deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır. R kare değeri %96,24 çıkmıştır. R kare sonucu iyi çıkmıştır. Modelin başarılı olduğunu gösterir. 'P' değeri 0,005'in altında başarılıdır. 'P' değeri sıcaklık için 0,087 hesaplanmıştır. Süre için 0,041 olarak hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık ve süre 0,005'in üstünde çıktığı için anlamlı değildir. F değerine bakıldığında sıcaklık için 4,77 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 7,91 çıkmıştır. Bunun anlamı 'F' değeri

büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre süre birinci derecede önemli parametredir, sıcaklık ise ikinci derecede önemli parametredir.

General Linear Model: SNRA1 versus Sıcaklık; Süre

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Sıcaklık	Fixed	3	700; 800; 900
Süre	Fixed	3	1; 3; 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sıcaklık	2	79,570	39,7850	88,98	0,000
Süre	2	13,788	6,8938	15,42	0,013
Error	4	1,789	0,4471		
Total	8	95,146			

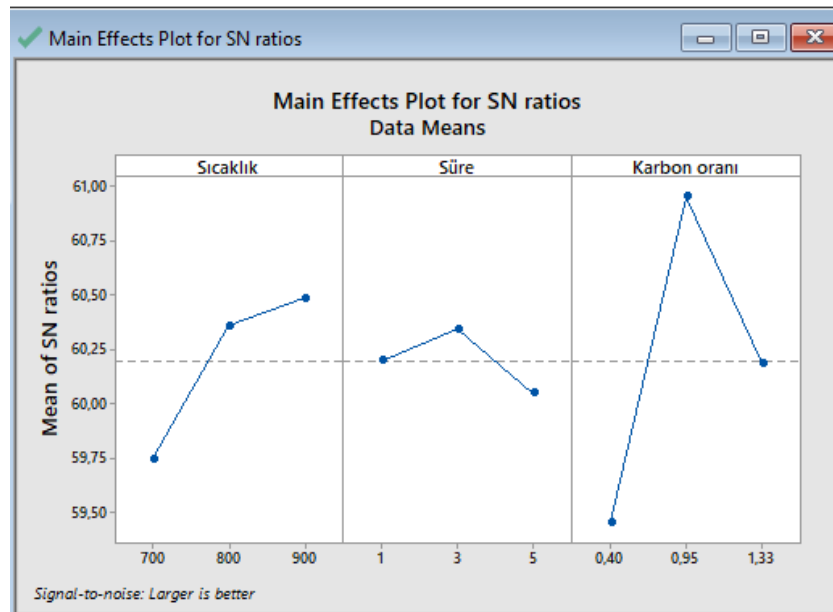
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,668679	98,12%	96,24%	90,48%

Şekil 4.138. Kaplanmış AISI M2 çeliği için kırılma tokluğu Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

4.13.7. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 sertlik sonuçlarına göre Taguchi deney tasarım modeli

Şekil 4.139.'da faktörlerin sertlik düzeyleri üzerindeki seviyeleri görülmektedir.

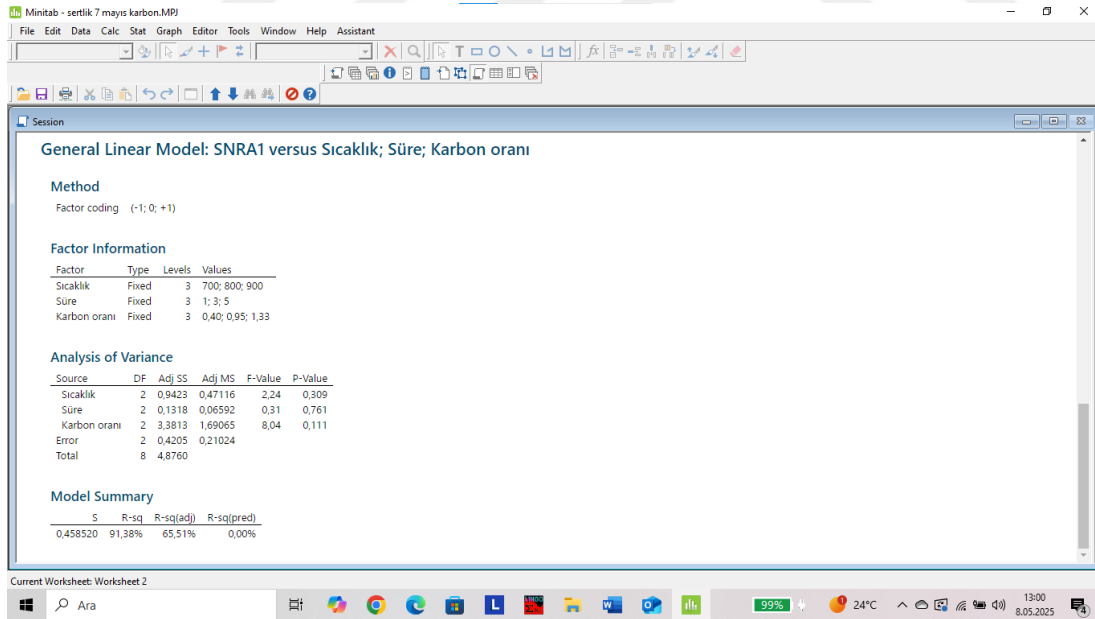


Şekil 4.139. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için faktörlerin sertlik düzeyleri üzerindeki seviyeleri

Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri sertlik değerleri için yapılan Taguchi deney tasarımı modelinde sıcaklık 800°C’de ve 900°C’de uygundur. 700°C ortalamanın altında kalmıştır ve uygun olmayan sıcaklık değeridir. Yapılan bu deney için 900°C en uygun değer parametresidir. Süre olarak sadece 3 saat en ideal değerdir. Süre olarak 5 saat ortalamanın altında kalmıştır. Süre 1 saat ortalama ile çakışık çıkmıştır ve o yüzden uygun değildir. Sertlik değerlerine göre 900°C de 3 saat en iyi değerdir.

Çeliklerin içerdikleri karbon yüzdeleri ve sertlik deney sonuçları kullanılarak uygulanan Taguchi tasarımında kaplanmış AISI M2 çeliği en iyi sonucu vermiştir. Kaplanmış AISI D2 çeliği ortalama ile çakışık çıktığından ötürü uygun değildir. Kaplanmış AISI 4140 çeliği çizginin altında çıktığı için uygun değildir. Sonuç olarak bu deneyde en ideal parametre değerleri sıcaklık 900°C de ve süre olarak 3 saat ile kaplanmış AISI M2 çeliği olmuştur.

Aşağıda yer alan Şekil 4.140.’da kaplanmış üç çelik türü için zaman, sıcaklık ve karbon yüzde oranları ve sertlik deney sonuçlarına göre yapılan Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri yer almaktadır.



Şekil 4.140. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için zaman, sıcaklık ve karbon yüzde oranlarına bağlı olarak sertlik seviyeleri Taguchi Deney Tasarımı Anova Testi Analizi, R kare sonucu, F ve P değeri

Sertlik değerleri deney sonuçlarına göre Anova testi uygulanmıştır. R kare değeri %91,38 çıkmıştır. R kare sonucuna göre kurulan model başarılıdır. ‘P’ değeri 0,005’in

altınada başarılıdır. 'P' değeri sıcaklık için 0,309 hesaplanmıştır. Süre için 0,761 olarak hesaplanmıştır. Karbon yüzdelerine göre 'P' değeri 0,111 hesaplanmıştır. Buna göre sıcaklık, süre ve karbon yüzdelerine göre 'P' değeri 0,005'in üstünde çıktığı için anlamlı değildir.

F değerine bakıldığında sıcaklık için 2,24 hesaplanmıştır. Süre için 'F' değeri 0,31 çıkmıştır. Karbon yüzde oranına göre 'F' değeri 8,04 hesaplanmıştır. Bunun anlamı 'F' değeri büyük çıkan değişkenin birinci derecede önemli parametre olduğudur. Bu deneye göre karbon yüzde oranı birinci derecede önemli parametredir, ikinci derecede önemli parametre sıcaklık, üçüncü derecede süre parametresi gelir.





5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Deney sonuçlarının Taguchi yöntemiyle elde edilen sonuçlarla kıyaslanması

Kaplanmış AISI 4140, AISI M2 ve AISI D2 çelikleri için kaplama kalınlığı ve kırılma tokluğu deney sonucundaki değerler Tablo 5.1. ve Tablo 5.2.'deki gibidir [76]. Taguchi yöntemiyle elde edilen sinyal/gürültü grafine göre kırılma tokluğu ideal parametreleri 900°C de 5 saat olarak gözlenmiştir. Kaplama kalınlığı kaplanmış üç çelik türü için A_3B_3 olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu üretim reçetesi de hesaplanmış aynı şekilde kaplanmış üç çelik türü için A_3B_3 olarak hesaplanmıştır. Ürün reçetesine göre A_3 : 'A'sıcaklık, '3' 900°C, B_3 : 'B'süre, '3' 5 saat anlamına gelmektedir. Sinyal/gürültü grafiğine bakılarak kaplanmış üç çelik türü için aralarında seçim yapmak mümkün değildir. Bunun nedeni ise, Minitab programında üçünün bir arada hesaplanmasının yapılamamasıdır.

Tablo 5.1. Deney sonuçlarına göre kaplanmış üç çeliğe ait olarak kaplama kalınlığı değişimleri [76]

Kaplama kalınlığı (μm)									
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	700			800			900		
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	37,56	62,92	83,48	74,47	142,89	201,25	138,16	214,74	280,38
AISI D2	35,45	59,45	72,77	52,59	142,74	202,62	166,16	284,51	346,33
AISI M2	33,00	55,59	74,33	71,84	151,28	204,75	155,33	270	336,29

Tablo 5.2. Deney sonuçlarına göre kaplanmış üç çeliğe ait kırılma tokluğu değişimleri[76]

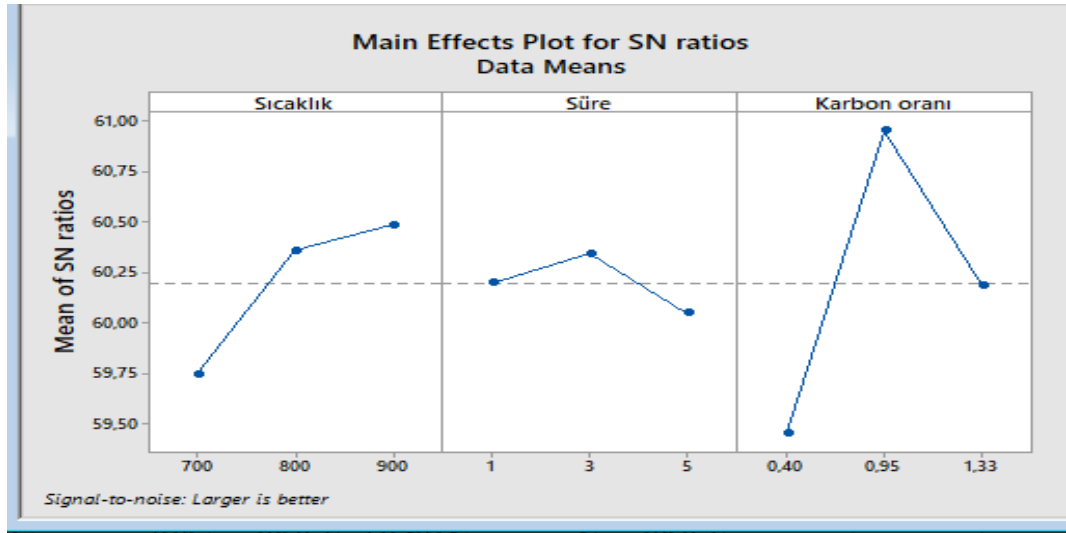
Kırılma Tokluğu ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)									
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	700			800			900		
Zaman(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
AISI 4140	0,92 $\pm$ 0,03	1,2 $\pm$ 0,44	1,54 $\pm$ 0,15	1,31 $\pm$ 0,24	1,6 $\pm$ 0,25	1,98 $\pm$ 0,17	1,61 $\pm$ 0,18	1,9 $\pm$ 0,49	2,15 $\pm$ 0,46
AISI D2	0,70 $\pm$ 0,09	1,5 $\pm$ 0,75	2,15 $\pm$ 0,73	1,2 $\pm$ 0,34	2,01 $\pm$ 0,17	2,77 $\pm$ 0,65	1,67 $\pm$ 0,37	2,12 $\pm$ 0,42	2,87 $\pm$ 0,82
AISI M2	1,26 $\pm$ 0,08	1,5 $\pm$ 0,51	1,9 $\pm$ 0,72	1,65 $\pm$ 0,11	2,06 $\pm$ 0,63	2,58 $\pm$ 0,30	1,90 $\pm$ 0,21	3,3 $\pm$ 0,57	3,95 $\pm$ 0,59

Sertlik değerlerine bakıldığı zaman durum farklıdır. Sertik değerlerine göre en iyi kaplanmış çelik türünü elde etmemizin nedeni Minitab programında kaplanmış üç çeliğinde aynı anda incelenmesidir. Matris boyutu Minitab programında uygulamaya uygun olması nedeniyle, kaplanmış üç çelik aynı anda sertlik deneyi tasarımı yapılmıştır. Sinyal/gürültü grafiği kaplama kalınlığı ve kırılma tokluğu hakkında en ideal parametreleri sunmaktadır. En ideal kaplanmış çelik türü kırılma tokluğu ve kaplama kalınlığı için budur diyememektedir. Ama deney sonuçlarına bakılarak en iyi sonucu veren sıcaklık süre değerleri ile kıyaslama yapılabilir. Şu yorum yapılabilir. Kırılma tokluğu için en iyi değer deney sonucuna göre kaplanmış AISI M2 çeliğidir. Bu en iyi değer 900°C de 5 saat sürede gerçekleşmiştir. Aynı şekilde kaplama kalınlığı için en ideal deney sonucu kaplanmış AISI D2 çeliğidir. Bu aynı şekilde 900°C de 5 saat sürede gerçekleşmiştir. Bu durumda deney sonuç değeri ile Taguchi yöntemi ile elde edilen analiz sonuçları eşleşmektedir. Taguchi deney tasarımı yöntemi ile kaplanmış üç çelik için Sinyal/gürültü grafiği ayrı ayrı elde edilmiştir.

Tablo 5.3. 15 µm yüzeyden itibaren demir alüminid ile kaplanan AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için sertlik dağılım deney sonuçları [76]

Yüzeyden itibaren mesafe (15 µm)		Sertlik (HV) (Kg/mm ²)								
Sıcaklık(°C)	700			800			900			% Karbon miktarı
Süre(saat)	1	3	5	1	3	5	1	3	5	
AISI 4140	908,3	950,0	908,3	960,0	908,3	907,6	952,1	1003,2	950,0	0,40
AISI D2	952,4	952,4	955,5	1058,0	1117,8	1058,2	1113,9	1003,2	1058,2	1,33
AISI M2	1003,2	1058,2	1058,2	1113,9	1178,4	1178,4	1113,9	1113,9	1113,9	0,95

Karbon yüzde oranı en fazla kaplanmış AISI D2 çeliği olmasına rağmen, Tablo 5.3'e bakıldığı zaman sertlik deney sonuçlarına göre kaplanmış AISI M2 çeliği en ideal değeri vermiştir.



Şekil 5.5.1. Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için zaman, sıcaklık ve karbon yüzde oranlarına bağlı olarak sertlik Taguchi deney tasarımı analizi

Taguchi tasarımı analiz sonuçlarına göre Şekil 5.1'e bakıldığında sertlik değerlerine göre 900°C de 3 saat ile kaplanmış AISI M2 çeliği en iyi sonucu vermiştir. Deney sonuçları ile Taguchi deney tasarımı sonuçları aynı çıkmıştır. Burada karbon değerlerine bakıldığında ise beklenen değeri karşılamadığı görülmüştür.

5.2. Sonuçlar

Taguchi yöntemi süreçlerde kontrol edilemeyen faktörlere karşın kontrol edebilen faktörlerin optimal seçmeye olanak tanıyan, süreçteki varyasyonu en aza indirmeye yardımcı olan deneysel tasarım yöntemlerinden biridir. Bu yöntem sayesinde hem ürün kalitesinin gelişmesinde etkili olması, hem de kaliteyi geliştirmek için yapılan deneme sayısını en aza indirerek az deneme ile aynı sonuçları verir.

Çok yanıtlı Taguchi deney tasarımı yöntemiyle çelik yüzeylerinde oluşturulan termo-kimyasal kaplama özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla üç farklı çelik grubu üzerindeki kaplama kalınlığı, kırılma tokluğu ve sertlik için ayrı ayrı deney sonuçları kullanılarak, Taguchi yöntemi uygulanmış süreç incelemesi yapılmıştır. Yapılan deneylerde kaplama kalınlığı, kırılma tokluğu ve sertlik çalışmalarında süreci etkileyen faktörler kontrol altına alınamadığı için deneme yanılma ile deney sayısı fazla olmaktadır. Bunun sonucunda maliyetlerde ve deney sürelerinde artışa neden olur.

Kaplama kalınlığı kaplanmış AISI 4140 çeliğı için üretim reçetesi A_3B_3 olarak oluşturulmuştur. Aynı şekilde kırılma tokluğu üretim reçetesi de hesaplanmış ve A_3B_3 olarak bulunmuştur. Yani bunun anlamı çalışmada sıcaklık (A) 3. seviye, süre(B) 3. seviye olduğunda tek seferde istenilen kaplama kalınlığında ve kırılma tokluğunda ürünler üretilir demektir.

Kaplanmış AISI D2 çeliğı için üretim reçetesi ise kaplama kalınlığı A_3B_3 olarak oluşturulmuştur. Kırılma tokluğu üretim reçetesi de hesaplanmış ve A_3B_3 olarak bulunmuştur. Kaplanmış AISI M2 çeliğı için üretim reçetesi de aynı şekilde çıkartılarak kaplama kalınlığı A_3B_3 olarak formüle edilmiştir. Kırılma tokluğu üretim reçetesi de hesaplanmış ve A_3B_3 olarak bulunmuştur.

Kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için zaman, sıcaklık ve karbon yüzde oranlarına bağlı olarak sertlik Taguchi deney tasarımına göre üretim reçetesi ise, $A_3B_3C_3$ olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı çalışmada sıcaklık (A) 3. seviye, süre (B) 2. seviye, yüzde karbon oranı (C) 3. seviye olduğunda tek seferde istenilen sertlikte ürünler üretilir demektir. Bu deneyde en ideal parametre değerleri, 900°C’de 3 saat süreyle 0,95 karbon oranı içeren kaplanmış AISI M2 çeliğı olmuştur.

Karbon içeriklerine bakarak kaplanmış AISI M2 çeliğı için ikinci en yüksek karbon yüzdesine sahip olması nedeniyle sertlik deneylerinde neden birinci sırada değer aldığı akıllara gelebilir. Bunun nedeni sertliği etkileyen dengeli bir bileşime sahip Tungsten (W) ve Molibden(Mo) içermesidir. Tungsten içeriğı 6,8, Molibden içeriğı 4,43 değerindedir. Bu oran AISI D2 çeliğinde ‘W’ için 0, ‘Mo’ 0,77’dir. AISI 4140 çeliğinde ise ‘W’ 0 iken ‘Mo’ 0,18’dir. AISI M2 çeliğinin diğer çeliklere oranla yüksek W ve Mo içermesi sertliğinin yüksek olmasının nedeni olur.

5.3. Öneriler

Taguchi Deneysel tasarım yöntemi ile kalitenin uygulanması için gerekli en önemli aşama üretim öncesinde yapılan tasarım çalışmalarıdır. Taguchi Deneysel tasarım yöntemi uygularken kurulan modelin anlamlı olması gerekir. Kurulan modelin kalitesini ölçmek için kurulan modele ANOVA testi uygulanmalıdır. Böylelikle kurulan modelin anlamlı olup olmadığı ölçülür. Modelin tutarlı olması çok önemlidir.

Taguchi yöntemini uygularken değişkenliğe neden olan kontrol edilebilir faktörlerin tanımlanması gerekir. Ayrıca kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini en az olacak

şekilde tasarımının yapılması son derecede önem arz eder.Yani prosesin performansını etkileyen parametreler doğru belirlenmelidir.

Demir alüminid ile kaplanmış AISI 4140, AISI M2, AISI D2 çeliklerinin sertlik deney sonuçlarına göre karbon değerleri baz alınarak Taguchi metodu uygulama sonuçları incelendiğinde beklenen değerleri karşılamadığı görülmüştür.Karbon eşdeğerleri üzerinden bir çalışma yapılması önerilir.





KAYNAKLAR

- [1] Canlı, M.E. (2023). Yay tipi ısı transferi arttırıcı içeren güneş enerjisi depolama ünitesinin enerji depolama performansının Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz ile optimizasyonu (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No.796219)
- [2] Gümüşkaşık, M., (2023). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunu kullanarak üretilen kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerinin Taguchi metoduyla analizinin yapılması, Harran Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa,
- [3] Özel, B. (2006). Arşimet vidalı türbinlerde verim ve hidrolik güç performansının Taguchi yöntemi ile optimizasyonu, Amasya üniversitesi yüksek lisans tezi, Amasya,
- [4] Maherlan, M., F., (2023).Nano-Silika ile modifiye edilmiş uçucu kül içeren harç karışımlarının mekanik ve kapiler su emme özelliklerinin Taguchi tasarım yöntemiyle analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,
- [5] Ramroom, A., A., M., (2020) Taguchi Metodu İle Üretilen Ultra Yüksek Performanslı Betonda (UYPB)Mineral Katkıların etkisi ve Optimizasyonu. Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu, 112s.
- [6] Seyitnur, A., (2022). Çoklu çarpan jetle ısı transferinde ısı alıcı dizayn parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Van,
- [7] Tanrısevdi, H., (2022). Farklı tahıl kepeklerinden ultrasound ön uygulamalı diyet gıda lift üretimi: Taguchi yöntemiyle optimizasyonu. Erciyes Üniversitesi, Kayseri,
- [8] Uran, Y.,(2022). Taguchi yöntemi kullanılarak hafif genleşmiş kil üretiminin optimizasyonu. Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik,
- [9] Şimşek, G., (2023). Elektrolif Çekimiyle Üretilen Nanoliflerin İnceliğini Etkileyen Parametrelerin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Sayı 51, S. 238-244, Ağustos 2023.
- [10] Kılıç, H., (2022). Titanyum di-borid ile fonksiyonel olarak derecelendirilmiş alüminyum ana yapılı kompozitlerin aşınma davranışlarının Taguchi yaklaşımıyla incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksel Lisans Tezi, İstanbul,
- [11] Yaka H., Atılğan, R.,(2023).Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(2), 2023 Araştırma Makalesi.

- [12] Özden, O., Gökçe, B.,(2023). Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Taguchi Metodu Kullanılarak Bir Kara Aracının Parametrik Olarak Optimum Tasarımının Geliştirilmesi. DUJE (Dicle University Journal of Engineering) 14:2 (2023) Sayfa 305-313
- [13] Şık, A., Akay, A., ve Bingöl, T., (2023). Tozaltı ark kaynak (saw) yönteminde kaynak genişliğinin Taguchi metoduyla optimizasyonu. ESOGÜ Müh. Mim. Fak. Dergisi 2023, 31(1), 558-571
- [14] Türkan, B., Taguchi metodu kullanılarak mürekkep püskürtülmesinin optimizasyon analizi. Pamukkale Univ. Muh. Bilim Derg. 2023;29(3):281-288 I DOI:10.5505/pajes.2022.97957
- [15] Kaya, E., (2022). Pem yakıt pili performansının Taguchi metodu ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile optimizasyonu. Bursa Teknik Üniversitesi,
- [16] Lıban, R., İ., (2022).Taguchi yöntemi ile uçucu kül ve kalker katkılı zeolit esaslı geopolimer harçların tasarlanması. Konya Teknik Üniversitesi, Doktora tezi, Konya,
- [17] Kasap, S.,S., (2022).Taguchi deney tasarımı ve yapay sinir ağları ile tetrakloroetilen kaynak zonlarının kompleks şekere ile ıslah optimizasyonunun modellenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Yüksek lisans tezi,
- [18] Kurt, Ü., Önbilgin, G., (2000).Eksenel akıllı sürekli mıknatıslı senkron makine tasarımında Taguchi yönteminin kullanılması. Ondokuzmayıs Üniversitesi.
- [19] Doğdu, G., Şen, N., E., (2023).Hindi Kesimhanesi Atıksuyunda Fotokatalitik Arıtma ve Taguchi Metodu ile Optimizasyon. OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 6(1): 1-20, 2023
- [20] Kahraman, H., İdris, C., Eren, B.,Çoban, A.,Biyodizel yakıtının tribolojik özelliklerinin yapay sinir ağı ve taguchi yaklaşımı ile optimizasyonu. Politeknik Dergisi, <http://dergipark.org.tr/politeknik>
- [21] Kafkas, F.,Gürbüz, H.,Şeker, U., (2022). AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Takım Geometrisi ve İşleme Parametrelerinin Yüzey Bütünlüğü Özelliklerine Etkisinin Taguchi Yöntemi ile Analizi.Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji, GU J Sci, Part C, 10(3): 391-407 (2022, <http://dergipark.gov.tr/gujsc>
- [22] Kılıç, S., Önen, S.K., Aslandağ, A., Koca, S.,Ömer, S.,(2022).Sac levhaların plastik tampon yardımıyla form verilmesi ve proses parametrelerinin Taguchi yaklaşımı ile optimizasyonu. Research Journal of Marine and Engineering Technology (JOINMET) 2(2), 68-77, 2022 Recieved: 03-Oct-2022 Accepted: 24-Oct-2022
- [23] Fedai, Y.,(2022).AISI 4140 Çeliğinin Frezelemesinin Taguchi-DEAR Yöntemiyle Optimizasyonu. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 9, No: 2, 2022 (882-897), www.dergipark.gov.tr ECJSE ISSN:2148-3736.
- [24] Türkan, B. (2022). Baca Gazı Destekli Organik Rankine Çevrimi için Taguchi Analizi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (34), 381-386.
- [25] Baynal K., Aksu B., Shainin and Taguchi Methods and Their Comparison on an Application, 1st International Symposium on Computing in Science & Engineering, Aydın, Türkiye, 3-5 Haziran 2010.

- [26] Motorcu A. R., Ç1050 ve Ç4140 Çeliklerinin Seramik Takımlarla İşlenmesinde Optimum Takım Ömrünü Sağlayan Parametrelerin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi ve Takım Aşınmalarının İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2009, 24(4),699-708.
- [27] Göloğlu C., Mızrak C., Bulanık Mantık ve Taguchi Yaklaşımlı Müşteri İstemli Ürün Belirleme, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2010, 25(1), 9-19
- [28] Altın A., Inconel 600 Süper Alaşımının Tornalanmasında İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2013, 28(4), 677-684.
- [29] Aslan S., Kayır Y., Aytürk A., AISI 316Ti Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Kesici Uç Etkisinin Taguchi Yöntemi ile Analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2013, 28(2), 363-372.
- [30] Cabir S., Kayıcı Pabuç Yüzey Tasarımının Taguchi ve Yapay Sinir Ağı Yöntemleri ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 2019, 562800.
- [31] Wu D., Chien W., Tsai Y., Applying Taguchi Dynamic Characteristics to the Robust Design of a Piezoelectric Sensor, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(3), 480-486.
- [32] Tsai H. H., Wu D. H., Chiang T. L., Chen H. H., Robust Design of SAW Gas Sensors by Taguchi Dynamic Method, Sensors, 2009, 9(3), 1394-1408.
- [33] Lunani M., Nair V. N., Wasserman G. S., Graphical Methods for Robust Design with Dynamic Characteristics. Journal Of Quality Technology, 1991, 29(3), 327-338.
- [34] Tan, O. Zaimoglu, A.S. Hınıslıoglu, S. ve Altun, S. 2005, Taguchi approach for optimization of the bleeding on cement-based grouts. Tunnelling and underground space technology, 20(2), 167-173
- [35] Türkmen, İ. Gül, R. ve Çelik, C. 2008, A Taguchi approach for investigation of some physical properties of concrete produced from mineral admixtures. Building and environment, 43(6), 1127-1137.
- [36] Olivia, M. and Nikraz, H. 2012, Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. Materials and Design, 36, 191-198
- [37] Riahi, S. Nazari, A. Zaarei, D. Khalaj, G. Bohlooli, H. ve Kaykha, M.M. 2012, Compressive strength of ash-based geopolymers at early ages designed by Taguchi method. Materials and Design, 37, 443-449.
- [38] Hadi, M.N. Farhan, N.A. ve Sheikh, M.N. 2017, Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. Construction and Building Materials, 140, 424-431.
- [39] Z.Y. Wu, H.W. Wu, C.H. Hung. Applying Taguchi method to combustion characteristics and optimal factors determination in diesel/biodiesel engines with portinjecting LPG, Fuel 117, 8–14, (2014)

- [40] T. Ganapathy, K. Murugesan , R.P. Gakkhar. Performance optimization of Jatropha biodiesel engine model using Taguchi approach, *Applied Energy* 86, 2476–2486, (2009).
- [41] Y.H. Tan, M.O. Abdullah, C.N. Hipolito, N.S.A. Zauzi. Application of RSM and Taguchi methods for optimizing the transesterification of waste cooking oil catalyzed by solid ostrich and chicken-eggshell derived CaO, *Renewable Energy* 114, 437-447, (2017).
- [42] Huang M-L, Hung Y-H, Yang Z-S. Validation of a method using Taguchi, response surface, neural network, and genetic algorithm. *Measurement*, 94:284–294, (2016).
- [43] Chate, G. R., GC, M. P., Harsha, H. M., Urankar, S. U., Sanadi, S. A., Jadhav, A. P., Deshpande, A. S., “Sustainable Machining: Modelling And Optimization Using Taguchi, MOORA and DEAR methods”. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 46(18): 8941-8947
- [44] Shankar, S., Mohanraj T., Pramanik, A., “Tool Condition Monitoring While Using Vegetable Based Cutting Fluids During Milling Of Inconel 625”. *J Adv Manuf Syst*. 2014, 18(04):563– 581
- [45] Moganapriya, C., Rajasekar, R., Mohanraj, T., Gobinath, V. K., Kumar, P. S., Poongodi, C. “Dry Machining Performance Studies on TiAlSiN Coated Inserts in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel and Multi-Criteria Decision Making Using Taguchi-DEAR Approach”. *Silicon*. 2021, 1:1-14
- [46] Vaddi, V.R., Sridhar Reddy, Ch., Pogaku, V.K., and Bushaboina, S.K., “Optimization of Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4 V) Using Taguchi-DEAR Method”, *SAE Technical Paper* 2018, 28(32)
- [47] Reddy, S., & Goteti, C. “Optimization Of Process Parameters For Multi Criterion Decision Making In Abrasive Water Jet Machining Of Magnesium-Silicon Based Aluminium Alloys”, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2021, 8(1):2067–3604
- [48] Kahraman, F., Başar, G., Koçoğlu, Z., Yenyıl, E. “Delik Büyütme İşleminde Kesme Parametrelerinin Çok Yanıtlı Taguchi Deneysel Tasarım Yaklaşımı Kullanılarak Optimizasyonu”. *Politeknik Dergisi*, 2018, 21: 283-290
- [49] Raj CB., Quen CHL. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: optimization of UV/H₂O₂ process through a statistical technique. *Chemical Engineering Science* 2005; 60(19): 5305–5311.
- [50] Hamzaçebi, Ç., 2000. Kalite yönetiminde Taguchi felsefesi, Gazi üniversitesi yüksek lisans tezi, Ankara
- [51] Sower V. E., Savoie M. J., Renick S., *An introduction to quality management and engineering*, 1st ed., Prentice Hall Inc., New Jersey, 1999.
- [52] Besterfield D. H., Besterfield C., Besterfield G. H., Besterfield M., *Total Quality Management*, 1st ed., Prentice Hall Inc., New Jersey, 1995.
- [53] Montgomery D. C., *Design and analysis of experiments*, 6th ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2005.

- [54] Baynal K., Altuğ G. S., Ünal Ğ., Ortodontik tellerin korozyon davranışının klasik deney tasarım yöntemi ile belirlenmesi, Mühendis ve Makina Dergisi, 2012, 629, 48-54.
- [55] Şirvancı M, Kalite için deney tasarımı: Taguchi yaklaşımı, 2. Baskı, Literatür Yayınevi, İstanbul, 1997.
- [56] Besterfield D. H., Besterfield C., Besterfield G. H., Besterfield M., Total Quality Management, 1st ed., Prentice Hall Inc., New Jersey, 1995.
- [57] Lunani M., Nair V. N., Wasserman G. S., Graphical methods for robust design with dynamic characteristics, Journal of Quality Technology, 1997, 29, 327-338.
- [58] JIJU A., Teaching advanced statistical techniques to industrial engineers and business managers, Journal of Engineering Design, 1998, 9, 89-100.
- [59] Baynal K., Altuğ G. S., Ünal Ğ., Ortodontik tellerin korozyon davranışının klasik deney tasarım yöntemi ile belirlenmesi, Mühendis ve Makina Dergisi, 2012, 629, 48-54.
- [60] Hicks C. R., Deney düzenlemede istatistiksel yöntemler, 2. Baskı., Gazi Kitabevi, Ankara, 2009.
- [61] Durmaz S., Taguchi metodunun kauçuğun vulkanizasyon prosesine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2008, 216048.
- [62] Breyfogle F. W., Implementing six sigma: smarter solutions using statistical methods, 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2003.
- [63] <http://www.gyte.edu.tr/Dersler/103/CMB523/cmb523-7a.ppt> (Ziyaret tarihi 20 Nisan 2014).
- [64] Gökçe B., Taşgetiren S., Kalite için deney tasarımı, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2009, 6, 71-83.
- [65] Şanyılmaz, M. (2006). Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi ile Bir Uygulama, (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No.182197)
- [66] Baynal K., Altuğ G. S., Ünal Ğ., Ortodontik tellerin korozyon davranışının klasik deney tasarım yöntemi ile belirlenmesi, Mühendis ve Makina Dergisi, 2012, 629, 48-54.
- [67] Lunani M., Nair V. N., Wasserman G. S., Graphical methods for robust design with dynamic characteristics, Journal of Quality Technology, 1997, 29, 327-338.
- [68] Özden, E., Elektrostatik toz boya proses parametrelerinin deney tasarımı yöntemleri ile optimizasyonu ve endüstriyel uygulaması. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [69] Mason, R. L., Gunst, R. F. and Hess, J. L. (2003). Statistical Design and Analysis of Experiments. A John Wiley & Sons, Inc, Publication, Second Edition, New Jersey.
- [70] Montgomery, D. C. (2008). Design and Analysis of Experiments, 8th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.

- [71] Kağmcıoğlu, C. H. (1998). Üretim Öncesi Kalite Kontrolünde Taguchi Yöntemi ve Kükürtdioksit Giderici Sitrat Yöntemine Uygulanması, (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No. 73415)
- [72] Mercan C. (2019). Doğrusal olmayan kovaryans analizi modelleri ile sosyal güvenlik verileri üzerine bir uygulama, (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No.569656)
- [73] Taguchi G., System of Experimental Design, 1st ed., ASI Press, Dearborn, 1991.
- [74] Bryne D. M., Taguchi S., The taguchi approach to parameter design, 1st ed., ASQC Quality Congress Transactions, Anaheim, CA, 1986.
- [75] Taguchi G., Wu Y. I., Introduction to off-line quality control, 1st ed., Central Japan Quality Control Association, Nagaya , 1979.
- [76] Yılmaz, E. (2008).Termoreaktif difüzyon yöntemiyle çeliklerden demir alüminid kaplaması, (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No.337022)
- [77] DSI Laboratuvarları İstatistik Tekniklerle Veri Analizi T alimatı (T0160002), 2020
- [78] <https://www.simplypsychology.org/p-value.html>
- [79] ÇİMENÖĞLU,H. ,GEÇKİNLİ,E., Çelik ve Dökme Demirlerin Metalografisi ve Mekanik Muayenesi, Metalurji Mühendisleri Odası, KOSGEB İMES, İstanbul ,say.32,34. ,16-18 Mayıs 2001

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Çiğdem CEBECİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Ön Lisans** : 2010, Sakarya Üniversitesi /Adapazarı Meslek Yüksek Okulu / Bilgisayar Teknolojileri ve Programlama
- **Lisans** : 2005, Sakarya Üniversitesi / Fen Edebiyat Fakültesi / Fizik Bölümü
 - 2016, Beykent Üniversitesi /Mühendislik Mimarlık Fakültesi / Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** :2007, Sakarya Üniversitesi / Sosyal Bilimler Enstitüsü / İşletme Anabilim Dalı/ Üretim ve Servis Sistemleri Yönetimi
 - 2010, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Orta Öğretim Alanlar Eğitimi Fizik Öğretmenliği Yüksek Lisans
 - 2022, Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019-Halen Sakarya Büyükşehir Belediyesi Saski Tesis Sorumlu Mühendisi
- 2018-2019M-Tec Mercedes Benz Fabrikası Kalite Yöneticisi
- 2016-2017Özel Sapanca İş Mak. Operatörlük Kurum Müdürü
- 2014-2015Milli Eğitim Bakanlığı Fizik, Matematik Öğretmeni
- 2007-2013Başak Traktör A.Ş. Kalite Mühendisi

YAZARIN ÖNCEKİ ÇALIŞMALARINDAN ÜRETİLEN ESERLERİ:

- Process Improvement with Lean Manufacturing Techniques in the Cable Company, Seda Pirvan¹, Safiye Turgay², Çiğdem Cebeci³ (Bildiri yayınlandı 2021)
- Lean Manufacturing Implementation for Process Improvement in the Cable Company: A Comprehensive Approach Safiye Turgay^{1a*}, Seda Pirvan^{2b}, Çiğdem Cebeci^{3c} 1,2,3 Department of Industrial Engineering, Sakarya University, Sakarya, Turkey (2023)
- A System Approach to Big Data-Driven Smart Municipality Response Model, Atilla Cebeci¹, Safiye Turgay², Orhan Torkul², Çiğdem Cebeci³, Rashmi Gujrati DOI: 10.23977/acss.2022.060611 ISSN 2371-8838 Vol. 6 Num. 6(2023)
- Stochastic Model for Integrated Preventive Maintenance Planning Safiye Turgay^{1,a,*}, Samet Koç^{1,b}, Çiğdem Cebeci^{1,c} (2023)
- TTime-Stratified Analysis of Electricity Consumption: A Regression and Neural Network Approach in the Context of Turkey Simge Yiğit, Safiye Turgay, Çiğdem Cebeci, Esma Sedef Kara(2024)
- Process Improvement with Lean Manufacturing Techniques in the Cable Company IMSS'21 Sakarya University - Sakarya/Turkey (Virtual + Onsite), 27-29 May 2021 (Bildiri)